



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Química

DANIEL DE SOUZA SIMÕES

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO NÚMERO DE  
POTÊNCIA DE AGITADORES DE PROXIMIDADE PARA  
LÍQUIDOS DE ALTA VISCOSIDADE

CAMPINAS  
2017

DANIEL DE SOUZA SIMÕES

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO NÚMERO DE  
POTÊNCIA DE AGITADORES DE PROXIMIDADE PARA  
LÍQUIDOS DE ALTA VISCOSIDADE

*Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia  
Química da Universidade Estadual de Campinas como  
parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Química.*

*Orientador:* PROF. DR. JOSÉ ROBERTO NUNHEZ

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À  
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO  
DEFENDIDA PELO ALUNO DANIEL DE  
SOUZA SIMÕES, E ORIENTADA PELO PROF.  
DR. JOSÉ ROBERTO NUNHEZ.

CAMPINAS  
2017

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** Não se aplica.

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Si51d Simões, Daniel de Souza, 1983-  
Determinação experimental do número de potência de agitadores de proximidade para líquidos de alta viscosidade / Daniel de Souza Simões. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: José Roberto Nunhez.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Estimativa de potência. 2. Mistura. 3. Fluidos newtonianos. 4. Processos químicos. 5. Tanques. I. Nunhez, José Roberto, 1961-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Experimental determination of power number of close clearance agitators for high viscosity liquids

**Palavras-chave em inglês:**

Power estimation

Mixture

Newtonian fluids

Chemical processes

Tanks

**Área de concentração:** Engenharia de Processos

**Titulação:** Mestre em Engenharia Química

**Banca examinadora:**

José Roberto Nunhez [Orientador]

Celso Fernandes Joaquim Junior

Raphael Soeiro Suppino

**Data de defesa:** 12-12-2017

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Química

Folha de Aprovação da Dissertação de Mestrado defendida por **Daniel de Souza Simões** e aprovada em 12 de dezembro de 2017 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

---

Prof. Dr. José Roberto Nunhez

FEQ/UNICAMP

---

Prof. Dr. Raphael Soeiro Suppino

FEQ/UNICAMP

---

Dr. Celso Fernandes Joaquim Junior

FATEC / BT

A ATA da Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no Processo de vida acadêmica do aluno.

# DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado a  
Eliana, Mãe Guerreira,  
que acreditou e me ensinou  
que sonhos não são utopia.*

# AGRADECIMENTOS

Não poderia comemorar mais um desafio cumprido na vida sem demonstrar minha gratidão às pessoas que, com suas parcerias, fizeram e fazem parte de minha trajetória.

À minha mãe, Eliana, por ter sido mãe e pai em todos os eventos de minha vida e por ser meu alicerce, sobretudo, nos momentos mais difíceis. Por ter me ensinado que o caráter é o bem mais valioso que podemos possuir e que o verbo “desistir” jamais deverá vigorar. Por ter me oferecido o amor mais puro e incondicional que possa existir.

À Amanda, mulher de minha vida, companheira que entendeu esse meu jeito estranho de ser. Amada Amanda, que me faz o homem mais realizado de qualquer parte do universo. Parceira de todas as horas e emoções e que ficará para sempre guardada em meu coração e tatuada em minh'alma.

À tia Silvana, pelos conselhos sempre sinceros. Grato pelo ombro mais que fraterno e pelo zelo infinito.

Ao avô Sebastião, pelas brincadeiras, pelas histórias e pela troca de experiências que só quem as possui tem a licença para contestá-las.

À avó Diva (*in memoriam*), que, seja lá em qual plano esteja, tenho a certeza que está sempre olhando e torcendo por mim. Sei que de alguma forma me guia nas vias da vida e tenho em suas garra e fé a referência para meus passos.

Aos meus sogros Luiz e Mercedes, meus cunhados Diego e Larissa e à tia Mako que jamais questionaram meu potencial e me receberam de braços abertos como membro de sua família.

Ao Professor José Roberto Nunhez por acreditar no meu trabalho e me dar respaldo técnico quando precisei. Agradeço, sobretudo, pela atenção que me foi dada e pela amizade criada.

À toda equipe do L-CFD: Diener, pelo apoio dado na parte experimental do projeto, pelos conselhos profissionais e pela amizade, Éwerton, Jefferson e aos colombianos mais brasileiros da UNICAMP (Sebastián, Milena, Helver, Fred, José Luis e Urbano).

Um agradecimento especial ao Luiz Biason que nos ajudou muito na usinagem e adaptações do projeto (impelidores, raspadores, tanque).

Enfim, agradeço a Deus, por guiar meu caminho, por ter me dado esta oportunidade e por estar ao meu lado em cada passo que dou em minha vida.

*“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível e, de repente, você estará fazendo o impossível.”*

**São Francisco de Assis**

# RESUMO

SIMÕES, Daniel S.; Determinação experimental do número de potência de agitadores de proximidade para líquidos de alta viscosidade. Campinas, UNICAMP, 2017. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Não é possível pensar em indústria sem a agitação. Ela está inserida em uma vasta quantidade de processos industriais. Para o sucesso efetivo destes processos, o uso de impelidores adequados para cada fim se torna necessário e sua escolha garante uma maior eficiência do processo. O custo final da energia gasta no processo depende, dentre outros fatores, do agitador, analisando, para isso, parâmetros de interesse como a melhor agitação, o menor tempo e a menor potência consumida. Existem na literatura poucos dados a respeito da potência de impelidores utilizados no meio industrial. Estes valores tendem a ficar restritos aos fabricantes destas peças. Os dados são ainda mais escassos quando os impelidores de interesse são aqueles que possuem dimensões próximas aos diâmetros internos dos tanques de mistura. Através de um sistema composto por um tanque de agitação com fundo toro esférico 10%, quadro elétrico com inversor de frequência e eixo rotacional ligado a um torquímetro foi possível obter experimentalmente curvas de Número de Potência *versus* Número de Reynolds no regime laminar para impelidores de proximidade como os do tipo âncora (pás retas e tubular) com e sem raspadores e do tipo fita helicoidal. Utilizou-se uma solução de glicose 91% como fluido. Verificou-se um menor consumo de potência para os impelidores âncoras sem raspadores quando comparados com o impelidor helicoidal e com os impelidores âncoras com raspadores no regime laminar. Comprovou-se que a mistura utilizada possuía caráter newtoniano e foram comparados os dados experimentais com correlações presentes na literatura. Foi possível verificar também que os dados obtidos através do torquímetro e do inversor de frequência apresentaram valores próximos, aumentando a confiabilidade dos dados. Constatou-se, nas condições deste trabalho, que a geometria não é um fator que altera significativamente o valor do número de potência para impelidores do tipo âncora, enquanto que o uso de raspadores eleva consideravelmente este valor.

Palavras-chaves: Impelidores de Proximidade; Helicoidal; Âncora; Raspadores; Número de Potência

# ABSTRACT

SIMÕES, Daniel S.; Experimental determination of power number of close clearance agitators for high viscosity liquids. Campinas, UNICAMP, 2017. Dissertation presented for obtaining of Master's title in Chemical Engineering.

It is not possible to think of an industry without thinking on agitation. Agitation is present in a large number of industrial processes. For the effective success of these processes, it is necessary to use suitable impellers for each application. The correct choice of an impeller ensures greater process efficiency. The final cost of energy spent in a process depends, among other factors, on the impeller. Thus, suitable agitation, good mixing, lower processing time and lower power consumption are factors of interest. Only few data regarding the power consumption of impellers used in the industrial setting are available. These values tend to be restricted to impeller manufacturers. Using a system composed of a 10% bottom head torispherical stirred tank, electric panel with frequency inverter and rotational axis connected to a torque meter, it was possible to obtain experimentally Power Number versus Reynolds Number curves in laminar regime for close clearance impellers such as anchor type (flat and tubular blades) with and without scrapers and flat blade helical impeller. It was used a glucose solution 91% as working fluid. It was verified the lowest power consumption for the anchor impellers without scrapers when compared to the helical and anchor impellers with scrapers in the laminar regime. An experimental test was carried out to confirm that the mixture used presented newtonian character. Experimental data were compared with correlations present in the literature. It was also possible to verify that the data obtained through the torque meter and frequency inverter presented close values, increasing the reliability of the results. It was found, under the conditions of this work, that the geometry is not a factor that changes the power number value significantly for anchor impellers, whereas the use of scrapers raises this value considerably.

Key-words: Close Clearance Impellers; Helical; Anchor; Scrapers; Power Number

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 2.1</b> - Tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação para um fluido newtoniano.....	21
<b>Figura 2.2</b> - Fórmula estrutural da glicose.....	22
<b>Figura 2.3</b> – Tipos de fluxos gerados por impelidores: (a) radial, (b) axial e (c) tangencial.....	23
<b>Figura 2.4</b> – Propulsores: (a) Hélice Marinha e (b) Impelidor Maxflo <sup>®</sup> .....	25
<b>Figura 2.5</b> – Pás: (a) Helicoidal de Fita Simples, (b) Helicoidal de Fita Dupla, (c) Âncora e (d) Maxblend <sup>®</sup> - (Sumitomo <sup>®</sup> <i>Mechanical Equipment</i> ).....	26
<b>Figura 2.6</b> – Turbinas: (a) Pás Planas, (b) Rushton, (c) Smith e (d) Pás Inclínadas.....	28
<b>Figura 2.7</b> – Impelidores de Alto Cisalhamento: (a) <i>High Speed Disperser Blade</i> e (b) Impelidor Rotor-Estator.....	29
<b>Figura 2.8</b> - Curva de potência elucidando regiões de diferentes regimes.....	34
<b>Figura 2.9</b> – (a) Representação do vórtice central num tanque de mistura e (b) vórtices formados por um impelidor âncora.....	35
<b>Figura 2.10</b> – Relações presentes num tanque padrão com impelidor âncora.....	36
<b>Figura 2.11</b> – Impelidores utilizados por BATTAGLINI (1998): 1 – âncora convencional; 2 - âncora modificada; 3 - parafuso 4 - fita helicoidal.....	43
<b>Figura 3.1</b> – Impelidores utilizados no projeto: (a) Helicoidal, (b) Âncora de pás retas e (c) Âncora de perfil tubular.....	45
<b>Figura 3.2</b> – Raspadores de teflon utilizados nos impelidores âncoras.....	46
<b>Figura 3.3</b> – Equipamentos auxiliares utilizados: (a) Viscosímetro e (b) <i>spindles</i> .....	47
<b>Figura 3.4</b> – (a) Representação da planta-piloto de agitação do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional e (b) foto real da mesma.....	49
<b>Figura 3.5</b> – Representação do tanque reacional: (a) vista frontal, (b) vista superior e (c) foto real.....	50
<b>Figura 3.6</b> – (a) Representação do torquímetro posicionado no eixo do impelidor e (b) foto real do aparelho.....	51
<b>Figura 3.7</b> – (a) Visor digital indicando valores de potência, torque e velocidade de rotação e (b) disposição do equipamento e do computador.....	52
<b>Figura 3.8</b> - Quadro elétrico com inversor de frequência da planta-piloto do L-	

CFD.....	52
<b>Figura 3.9</b> – (a) Vista lateral da porção responsável pela alteração de altura do impelidor e (b) foto real.....	53
<b>Gráfico 3.1</b> - Viscosidade observada com a elevação da porcentagem de glicose à mistura.....	56
<b>Gráfico 4.1</b> - Verificação do caráter newtoniano da mistura utilizada.....	58
<b>Gráfico 4.2</b> - Comparativo entre curvas de potência para o impelidor de perfil tubular com e sem raspadores.....	61
<b>Gráfico 4.3</b> - Comparativo entre curvas de potência para o impelidor âncora de pás retas com e sem raspadores.....	62
<b>Gráfico 4.4</b> - Comparativo entre curvas de potência para os impelidores âncora de mesmas geometrias.....	63
<b>Gráfico 4.5</b> - Curvas de potência para os impelidores do projeto.....	64
<b>Gráfico 4.6</b> - Comparativo das curvas de potência utilizando o torquímetro e o inversor de frequência para os impelidores do projeto.....	66
<b>Gráfico 4.7</b> - Comparativo entre curvas de potência experimental (H) e da literatura para o impelidor helicoidal.....	67
<b>Gráfico 4.8</b> - Comparativo entre curvas de potência experimental (ATS) e da literatura para impelidores âncora sem raspadores.....	69
<b>Gráfico 4.9</b> - Comparativo entre curvas de potência experimental (ARS) e da literatura para impelidores âncora sem raspadores.....	69

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Relações geométricas recomendadas para os impelidores âncora e helicoidal.....	<b>37</b>
<b>Tabela 2.2</b> - Principais correlações.....	<b>44</b>
<b>Tabela 3.1</b> - Dimensões e características dos impelidores utilizados.....	<b>46</b>
<b>Tabela 3.2</b> - Programas utilizados no projeto.....	<b>48</b>
<b>Tabela 3.3</b> - Máximos valores de RPM para os impelidores testados no regime laminar.....	<b>54</b>
<b>Tabela 3.4</b> - Percentual de glicose em água e suas respectivas viscosidades.....	<b>55</b>
<b>Tabela 4.1</b> - Verificação do caráter newtoniano da mistura (glicose 91%).....	<b>57</b>
<b>Tabela 4.2</b> – Dados experimentais e valores de $Re$ e $N_p$ obtidos – Âncora tubular com raspadores – ATR ( $D = 0,345$ m; $r = 1380$ kg/m <sup>3</sup> ; $m = 7,5$ Pa.s).....	<b>59</b>
<b>Tabela 4.3</b> - Dados experimentais e valores de $Re$ e $N_p$ obtidos – Âncora tubular sem raspadores – ATS ( $D = 0,345$ m; $r = 1380$ kg/m <sup>3</sup> ; $m = 7,5$ Pa.s).....	<b>59</b>
<b>Tabela 4.4</b> - Dados experimentais e valores de $Re$ e $N_p$ obtidos – Âncora de pás retas com raspadores – ARR ( $D = 0,345$ m; $r = 1380$ kg/m <sup>3</sup> ; $m = 7,5$ Pa.s).....	<b>59</b>
<b>Tabela 4.5</b> - Dados experimentais e valores de $Re$ e $N_p$ obtidos – Âncora de pás retas sem raspadores – ARS ( $D = 0,345$ m; $r = 1380$ kg/m <sup>3</sup> ; $m = 7,5$ Pa.s).....	<b>60</b>
<b>Tabela 4.6</b> – Dados experimentais e valores de $Re$ e $N_p$ obtidos – Helicoidal – H ( $D = 0,36$ m; $r = 1380$ kg/m <sup>3</sup> ; $m = 7,5$ Pa.s).....	<b>60</b>
<b>Tabela 4.7</b> – Erro relativo – helicoidal.....	<b>68</b>
<b>Tabela 4.8</b> – Erro relativo – âncora tubular sem raspador - ATS.....	<b>70</b>
<b>Tabela 4.9</b> – Erro relativo – âncora reta sem raspador – ARS.....	<b>70</b>

# LISTA DE SÍMBOLOS

## LETRAS LATINAS

$c$	<i>Clearance</i> : distância entre parede interna do tanque e impelidor, m
$D$	Diâmetro do impelidor, m
$h$	Altura da haste/pá da âncora, m
$h_h$	Altura do impelidor helicoidal, m
$n$	Número de hélices do impelidor helicoidal
$N$	Velocidade de rotação do impelidor, $\text{rot.s}^{-1}$
$np$	Número de pás/braços
$N_p$	Número de Potência
$N_R$	Número de fitas do impelidor helicoidal
$p$	Passo/ <i>Pitch</i> : distância entre linhas de fluxo ou altura da “virada da hélice”, m
$P$	Potência, W
$Re$	Número de Reynolds
$Re_a$	Número de Reynolds aparente
$T$	Diâmetro interno do tanque, m
$w$	Largura da pá, m
$\bar{x}$	Valor de determinada Correlação
$Z$	Altura do fluido, m

## LETRAS GREGAS

$\Delta\bar{x}$	Erro absoluto, %
$(\Delta\bar{x})_r$	Erro relativo, %
$\mu$	Viscosidade, Pa.s
$\rho$	Densidade, $\text{kg/m}^3$

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS.....	18
<b>1.1.1 Objetivo geral.....</b>	<b>18</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>18</b>
1.2 ORGANIZAÇÃO DESTA DISSERTAÇÃO.....	18
<b>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.</b>	<b>20</b>
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
<b>2.1.1 Comportamento de um fluido newtoniano .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2 Xarope de glicose.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.3 Classificação dos impelidores.....</b>	<b>22</b>
2.1.3.1 <i>Tipos de fluxo.....</i>	22
2.1.3.2 <i>Forma física.....</i>	24
<b>2.1.4 Impelidores de proximidade (<i>close clearance impellers</i>).....</b>	<b>29</b>
2.1.4.1 <i>Impelidor Âncora.....</i>	30
2.1.4.2 <i>Impelidor Helicoidal.....</i>	31
<b>2.1.5 Número de Reynolds.....</b>	<b>32</b>
<b>2.1.6 Potência.....</b>	<b>32</b>
<b>2.1.7 Desenvolvimento das relações de potência.....</b>	<b>33</b>
<b>2.1.8 Curvas de potência.....</b>	<b>34</b>
<b>2.1.9 Vórtice.....</b>	<b>35</b>
<b>2.1.10 Elementos do tanque.....</b>	<b>36</b>
2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
<b>2.2.1 Literaturas relacionadas ao projeto.....</b>	<b>40</b>
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>45</b>
3.1 MATERIAIS.....	45
<b>3.1.1 Planta-piloto de agitação.....</b>	<b>48</b>
3.2 MÉTODOS.....	53
<b>3.2.1 Configurações para o regime laminar.....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.2 Estudo da melhor concentração da mistura.....</b>	<b>55</b>

<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>57</b>
4.1 CONFIRMAÇÃO DO CARÁTER NEWTONIANO DA MISTURA.....	57
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	58
4.3 COMPARATIVO DOS IMPELIDORES ÂNCORA DE MESMAS GEOMETRIAS: COM E SEM RASPADORES.....	61
<b>4.3.1 Âncora tubular.....</b>	<b>61</b>
<b>4.3.2 Âncora de pás retas.....</b>	<b>62</b>
4.4 COMPARATIVO DOS IMPELIDORES ÂNCORA DE DIFERENTES GEOMETRIAS: COM E SEM RASPADORES.....	63
4.5 CURVAS DE POTÊNCIA – VISÃO GERAL.....	64
4.6 COMPARATIVO ENTRE DADOS DO TORQUÍMETRO E DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	66
4.7 COMPARATIVO ENTRE DADOS DA LITERATURA E DO PROJETO PARA O IMPELIDOR HELICOIDAL.....	67
4.8 COMPARATIVO ENTRE DADOS DA LITERATURA E DO PROJETO PARA O IMPELIDOR ÂNCORA.....	68
4.9 DIFICULDADES OBSERVADAS.....	71
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>72</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	72
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

---

A mistura é uma operação unitária utilizada em indústrias de vários segmentos. Sem ela não existiriam inúmeros produtos que hoje fazem parte do portfólio da vida moderna. Em processos de mistura é comum o uso de tanques (reatores) para acomodar os insumos e assim, após o período de mistura, se obter o produto final desejado.

Mas não há mistura efetiva sem impelidores. O uso destes se torna essencial para se atingir o êxito almejado. O conhecimento do sistema e as informações das necessidades do mesmo são parte da escolha do melhor impelidor. Paralelamente, o gasto energético do impelidor deve ser levado em consideração, visto que em muitos processos acarreta em boa porcentagem do custo final do projeto.

Alguns impelidores conseguem melhores resultados quando atuam em específicas faixas de viscosidades, outros apresentam menores tempos de misturas e outros apresentam um menor consumo de potência. Em função do que se almeja alcançar no processo, deve-se escolher o impelidor mais adequado àquela necessidade.

Infelizmente, os dados de consumo de potência de impelidores estão, na maioria das vezes, restritos aos fabricantes destes aparatos, o que torna difícil sua comparação em muitos casos. É por este fato que esta pesquisa se torna ainda mais atraente. Dados de potência de impelidores do tipo helicoidal e âncoras convencional e tubular foram coletados e curvas de potência foram obtidas com o objetivo de fornecer um maior número de informações acadêmicas sobre esses sistemas.

Várias operações dependem da agitação e mistura de fluidos como pode ser exemplificado em indústrias que atuam com processamento de alimentos, cosméticos e químicos em geral.

Mistura é a redução da não homogeneidade para atingir o resultado desejado do processo (PAUL, ATIEMO-ONBENG e KRESTA, 2004).

Para Kukukova, Aubin e Kresta (2009), a definição de mistura industrial é baseada em três dimensões de segregação: intensidade de segregação (escala de concentração), escala de segregação (escala de comprimento) e exposição (taxa de mudança de segregação).

Paul, Atiemo-Onbeng e Kresta (2004) citam que a mistura é comum em processos de vários tipos de indústrias. Podem-se citar a química fina, agroquímica, farmacêutica, petroquímica, biotecnológica, de processamento de polímeros, de tintas, cosmética, alimentícia, de papel e celulose, de processamento mineral, entre outras. Pode-se constatar pelos exemplos citados a importância de operações de mistura na indústria química como um todo. Os autores também relatam que a mistura pode ocorrer seguindo alguns dos mecanismos relatados abaixo:

- Dispersão ou Difusão: é o ato do espalhamento (B é disperso em A);
- Difusão Molecular: é uma difusão provocada por relativo movimento molecular;
- Difusão Turbulenta: é a dispersão em fluxos turbulentos causados por movimentos de grandes grupos de moléculas chamadas “redemoinhos”. Este movimento é caracterizado por oscilações na velocidade turbulenta;
- Advecção: é a dispersão causada pelo movimento dentro do tanque;
- Dispersão Taylor: é um caso especial de convecção, em que a dispersão é causada por um gradiente de velocidade médio. É mais frequente quando referido ao caso de fluxo de tubo laminar, onde a dispersão axial aumenta devido ao gradiente de velocidade parabólico no tubo.

O mecanismo de mistura laminar, típico de materiais viscosos, pode ser considerado como envolvendo duas operações: reorientação e redistribuição. Consegue-se obter isso “cortando” e depois “reempilhando” o material seccionado. O material empilhado é então cisalhado ou alongado e depois redistribuído para mais reorientações. Como o número de reorientações e redistribuições aumenta, a área interfacial se eleva. Esta área interfacial aumentada eventualmente permite que haja difusão no intuito de homogeneizar o material (PAUL, ATIEMO-ONBENG e KRESTA, 2004).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

➤ Determinar, experimentalmente, o número de potência para sistemas agitados por impelidores dos tipos helicoidal e âncora com pás retas e com perfil tubular (testes com e sem raspadores), no regime laminar com o uso de uma solução concentrada de glicose de milho.

### 1.1.2 Objetivos específicos

➤ Comparar os resultados experimentais através de dados obtidos pelo inversor de frequência e pelo torquímetro.

➤ Comparar os dados obtidos com correlações existentes na literatura.

➤ Avaliar, experimentalmente, a variação de número de potência em relação ao número de Reynolds, para o fluido newtoniano de estudo, usando um impelidor helicoidal e impelidores tipo âncora (reto e tubular) com e sem raspadores.

➤ Verificar o caráter newtoniano do fluido utilizado no projeto.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DESTA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi organizada da seguinte maneira:

**Capítulo 1 – Introdução:** Neste capítulo são listados os objetivos gerais e específicos, bem como algumas outras informações relevantes, incluindo a organização da dissertação.

**Capítulo 2 – Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica:** Alguns parâmetros são utilizados para caracterizar e desenvolver as relações de potência. É mostrada a dependência entre estes parâmetros e a curva de potência é elucidada, destacando-se as faixas dos principais regimes. Os impelidores são classificados quanto à sua geometria e quanto ao fluxo gerado. Há uma abordagem teórica do assunto, expondo um pouco sobre as características dos diferentes impelidores. É dado um destaque especial aos impelidores de proximidade. Alguns estudos anteriores relacionados a tanques de mistura e potência de

impelidores são apresentados. Uma maior ênfase é dada aos estudos de potência de impelidores de proximidade, alvo primordial desta dissertação. Algumas equações de interesse deste trabalho são apresentadas.

**Capítulo 3 – Materiais e Métodos:** A parte experimental, com a descrição detalhada dos principais equipamentos e *softwares* para a coleta e o respectivo tratamento dos dados, é apresentada. Há a abordagem do método empregado para que esta dissertação fosse concluída.

**Capítulo 4 – Resultados e Discussão:** Os resultados são expostos e discutidos, utilizando dados de estudos anteriores como parâmetros de comparação. Algumas dificuldades na execução da parte prática e as peculiaridades de alguns pontos são postas em pauta e comentadas.

**Capítulo 5 – Conclusão e Sugestões:** Com os dados em mãos, pôde-se concluir o trabalho. Os resultados obtidos são explanados e uma reflexão é feita, tendo como base os objetivos iniciais do projeto. Há a apresentação de algumas sugestões que poderão aprimorar futuros estudos nesta área.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

---

#### 2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

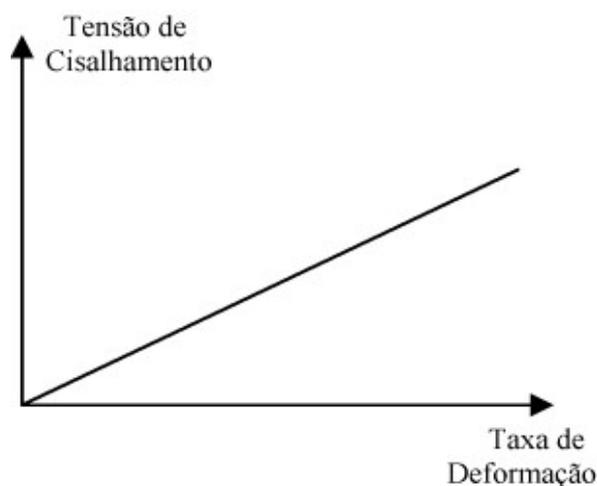
##### 2.1.1 Comportamento de um fluido newtoniano

A viscosidade de um fluido Newtoniano depende apenas da temperatura e pressão. Quando se trabalha com temperatura e pressão constantes, o comportamento Newtoniano é caracterizado de acordo com Barnes, Hutton e Walters (1989) da seguinte maneira:

1. A tensão de cisalhamento é a única tensão gerada no fluxo de cisalhamento simples;
2. A viscosidade de cisalhamento é independente da taxa de cisalhamento;
3. A viscosidade não varia com o tempo de cisalhamento e a tensão no líquido cai a zero logo após o cisalhamento ter sido encerrado. A viscosidade de algum cisalhamento subsequente (independentemente do período de tempo entre as medidas) é como antes;
4. As viscosidades medidas em diferentes tipos de deformação (fluxo de cisalhamento uniaxial e simples) estão sempre em simples proporção umas com as outras.

A Figura 2.1 expõe a curva esperada para um fluido newtoniano.

**Figura 2.1** - Tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação para um fluido newtoniano.



Fonte: PEREIRA, OLIVEIRA e ROMEIRO (2002)

### 2.1.2 Xarope de glicose

Belitz e Grosch (1987) relatam que através de matérias-primas ricas em amido como milho, mandioca e batata é possível se obter o xarope de glicose. Para que o amido seja convertido em xarope de glicose é necessária a hidrólise ácida, ácida enzimática ou por meio enzimático e assim, o xarope que é obtido, se compõe de concentrações diferentes de dextrose, maltose e polissacarídeos.

Charley e Weaver (1998) expõem que a classificação dos xaropes de glicose é dada em função do grau de hidrólise do amido, utilizando-se o parâmetro DE (valor equivalente de dextrose). Quanto mais alto o valor de DE, maior será o grau de hidrólise sofrido pelo amido e, então, maior será a concentração de dextrose no xarope.

Jeffery (1993) menciona que o xarope de glicose e o açúcar invertido possuem determinadas propriedades funcionais que asseguram a qualidade dos produtos. É possível citar o poder edulcorante mais elevado que o da sacarose, a elevada viscosidade, a solubilidade perfeita, o poder higroscópico e o controle da cristalização. Podem ainda elevar o tempo de vida útil de prateleira e melhorar brilho e textura de produtos alimentícios como bombons.

Xarope de glicose em sua forma não diluída é um fluido Newtoniano transparente extremamente viscoso com uma viscosidade aproximada de  $10^5$  cP à temperatura ambiente (MURRAY e LUFT, 1973).

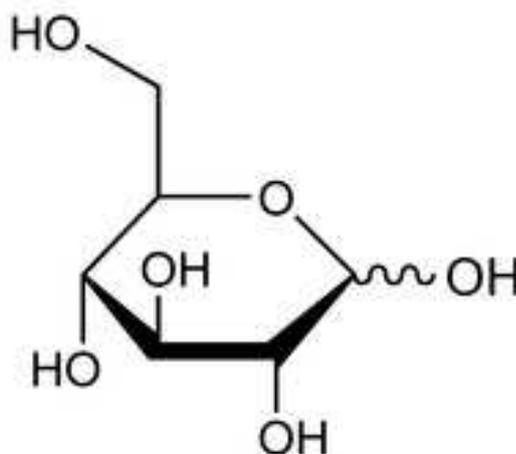
A viscosidade, uma importante propriedade física do xarope de milho, é dependente da densidade, DE e temperatura. A viscosidade diminui quando o DE e a

temperatura são elevados. Em contrapartida, a viscosidade aumenta com a maior densidade (BURDOCK, 1997).

Em altas viscosidades, é extremamente estável se mantendo assim por um longo período de tempo (PAUL, ATIEMO-ONBENG e KRESTA, 2004).

A Figura 2.2 mostra a fórmula estrutural da glicose.

**Figura 2.2** - Fórmula estrutural da glicose.



Fonte: The Merck Index Online<sup>1</sup>

### 2.1.3 Classificação dos impelidores

Os impelidores, por possuírem geometrias diferentes, tendem a gerar fluxos peculiares nos fluidos. Assim sendo, podem ser classificados quanto ao fluxo gerado dentro do tanque e quanto à forma física.

#### 2.1.3.1 Tipos de fluxo

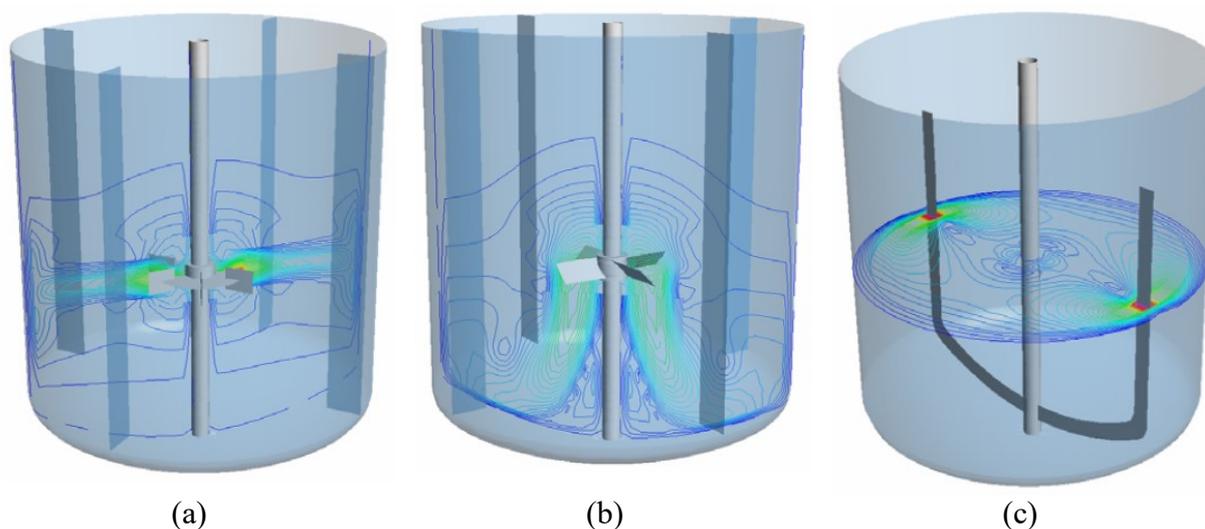
Os fluxos gerados podem ser agrupados em três grupos: fluxo radial, fluxo axial e fluxo tangencial.

É importante ressaltar que a disposição do impelidor afeta o padrão de fluxo e que os impelidores não apresentam um único padrão de fluxo. Na realidade, todo impelidor produz os 3 tipos distintos de fluxo. O que existe é a predominância de um padrão sobre outro(s) determinado pela geometria do impelidor (SILVA, 2010).

<sup>1</sup> Disponível em: <<https://www.rsc.org/Merck-Index/monograph/m5765/glucose?q=unauthorize>>. Acesso em 04/05/2017.

A Figura 2.3 expõe os diferentes tipos de fluxo gerado pelos impelidores.

**Figura 2.3** – Tipos de fluxos gerados por impelidores: (a) radial, (b) axial e (c) tangencial.



Fonte: SPOGIS (2002)

Spogis (2002) relata que no fluxo radial, as linhas de fluxo geradas se apresentam de forma perpendicular ao eixo do agitador e assim o líquido é impulsionado contra as paredes do reator. Os impelidores deste grupo geralmente apresentam potência consumida elevada, capacidade dispersiva grande e mostram uma agressividade maior ao produto. São utilizados, sobretudo, na dispersão de produtos gasosos, em processos de forte transferência de massa e para dissolução de materiais no estado sólido.

Como exemplos deste grupo, podem-se citar as turbinas de pás retas e inclinadas e a turbina de disco (Rushton e Smith). Estes impelidores são apropriados para fluidos de baixa viscosidade.

No fluxo axial, as linhas de fluxo se mostram paralelas ao eixo do impelidor e, assim sendo, a massa líquida é impulsionada contra o fundo do reator. Como características marcantes destacam-se o consumo de potência baixo, pouca agressividade ao produto e elevada abrangência por existir uma boa distribuição geométrica do fluxo dentro do reator. São utilizados, principalmente, em processos de transferência de calor, sólidos em suspensão e na mistura de substâncias no estado líquido (SPOGIS, 2002).

A hélice naval, as turbinas de pás inclinadas e impelidores de alto rendimento são apontadas como exemplos deste grupo. São mais adequados para fluidos de baixa viscosidade.

O padrão de fluxo pode modificar-se através de alguns parâmetros como viscosidade do fluido, diâmetro do impelidor utilizado e até mesmo pela utilização de mais de um impelidor. Um exemplo citado por Joaquim Jr. et al. (2007) é o do fluxo gerado pelo impelidor de pás inclinadas. Sabe-se que ele apresenta um fluxo axial, mas possui também uma componente radial. Alguns pesquisadores afirmam que o impelidor tipo pás retas inclinadas possui um fluxo misto.

No fluxo tangencial, são geradas linhas de fluxo circulares em regime laminar. Também conhecido por rotação sólida. Ocorre em sistemas onde há a necessidade da mistura de produtos de elevada viscosidade e o fluido é impulsionado ao redor da parede do tanque em movimento circular lento. Este grupo é formado por impelidores que consomem elevada potência, apresentam alto torque e o investimento em sua aquisição é alto (SPOGIS, 2002).

O impelidor do tipo âncora é um representante deste grupo.

### 2.1.3.2 *Forma física*

Para o regime laminar são utilizados impelidores com diâmetros próximos ao do tanque, pois, neste tipo de regime, o transporte de quantidade de movimento e massa é baixo. Assim sendo, não se usa chicanas. Para regimes turbulentos, o uso de impelidores com diâmetros próximos ao do tanque se torna pouco usual. Nesse caso, impelidores com diâmetro entre um quarto até metade do diâmetro do tanque garantem a eficiência da transferência da quantidade de movimento (TATTERSON, 1991).

De acordo com Uhl e Gray (1966), as inúmeras configurações de impelidores podem ser agrupados em quatro categorias com maior importância comercial. São elas:

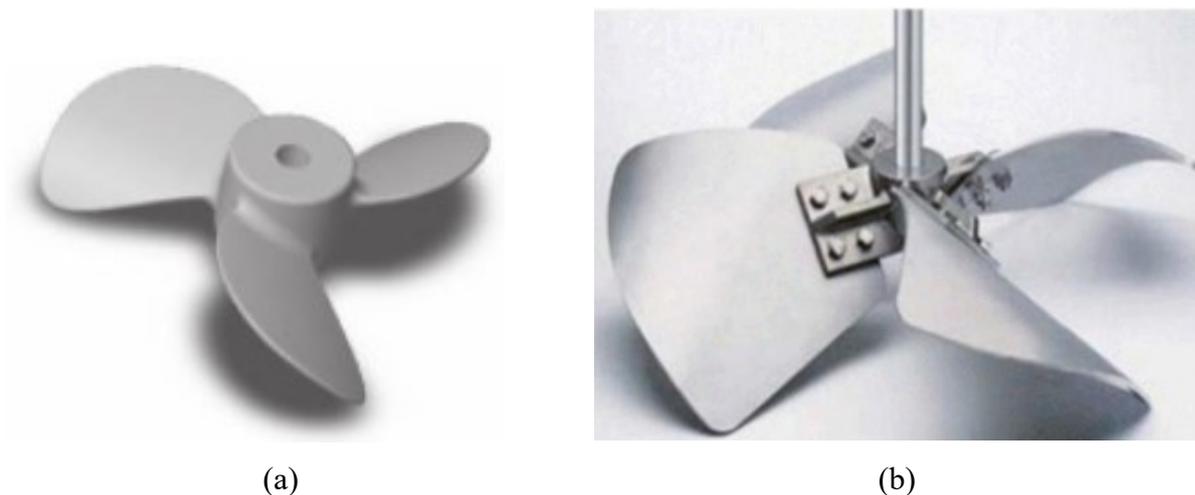
#### ➤ **Propulsores:**

Uhl e Gray (1966) relatam que são impelidores axiais que fazem com que o fluido se dirija para o fundo do tanque e assim há um espalhamento da corrente de forma radial em todas as direções. Após este movimento, a corrente sobe ao longo da parede e retorna à zona de sucção do rotor. Seu uso está atribuído principalmente quando grandes correntes verticais são exigidas no processo. Fornecem baixa tensão de cisalhamento. São essencialmente impelidores de alta velocidade de fluxo axial. Usados geralmente para fluidos de média e baixa viscosidade. Quase não há restrições quanto à forma ou tamanho do tanque. São exemplos de propulsores a **Hélice Marinha** (apto para processos de misturas de sólidos e

emulsões; utilizado a elevadas velocidades) e o **Impelidor Maxflo<sup>®</sup>** (bom impelidor para suspensão de sólidos abrasivos; apresenta elevado bombeamento).

A Figura 2.4 apresenta os principais impelidores propulsores.

**Figura 2.4** – Propulsores: (a) Hélice Marinha e (b) Impelidor Maxflo<sup>®</sup>.



Fontes: (a) MCKEEN (2015), (b) MEYER e SCHMIDHALTER (2014)

#### ➤ **Pás:**

Uhl e Gray (1966) explicam que estes impelidores são ótimos fornecedores de fluxo radial no plano do rotor, mas não geram fluxo vertical. São utilizados a velocidades de baixa rotação e para misturar líquidos de elevada consistência. São exemplos deste tipo de impelidor, o **Helicoidal de Fita Dupla** (geralmente apresentam diâmetro com cerca de 95% do diâmetro do tanque; recomendado para fluidos de elevadas viscosidades atuando em regime laminar; boa transferência de calor e mistura de líquidos e sólidos), **Fita Helicoidal com Parafuso** (também apresenta diâmetro próximo a 95% do diâmetro do tanque; eficiência apreciável em elevadas viscosidades; o fato da existência do parafuso central garante uma remoção de sólidos e fluidos desde a parede, pois é criado um fluxo axial ascendente; a transferência de calor não é tão acentuada quanto o de fita dupla); **Âncora** (atua em regime laminar com fluidos de elevadas viscosidades, apresenta economia de energia e tempo de mistura um pouco superior ao de fita helicoidal; a adaptação de raspadores de parede é comum para que a transferência de calor aumente); **Impelidor Parafuso** (é um impelidor que apresenta dimensão relativa próxima à metade do diâmetro do reator; utilizado em processos

para misturar polímeros de elevadas viscosidades e que possuam sensibilidade ao cisalhamento; empregado, sobretudo, em trabalhos com fluidos pseudoplásticos).

A Figura 2.5 mostra os principais impelidores pás.

**Figura 2.5** – Pás: (a) Helicoidal de Fita Simples, (b) Helicoidal de Fita Dupla, (c) Âncora e (d) Maxblend<sup>®</sup> - (Sumitomo<sup>®</sup> *Mechanical Equipment*).



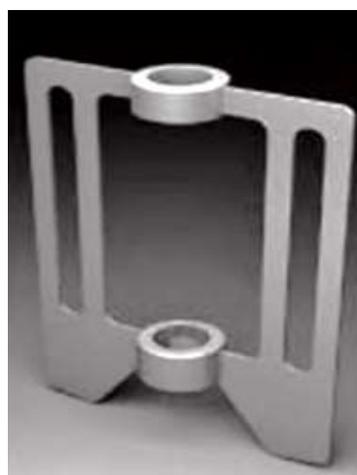
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: KRESTA et al. (2015)

O impelidor **Helicoidal de Fita Simples** é utilizado para viscosidades entre 10 e 1000 Pa.s, aproximadamente. Pode ser operado em fluxos ascendente ou descendente. No fluxo descendente, o impelidor fornece uma melhor uniformidade de mistura, enquanto que no ascendente, o equipamento é mais aplicado em transferência de massa envolvendo uma grande área interfacial gás-líquido. Outro representante é o **Maxblend<sup>®</sup>** que é projetado para

ocupar uma grande área na seção vertical do tanque e é conhecido por produzir melhor desempenho que as pás convencionais (no regime turbulento com chicanas) e que os helicoidais (para  $Re$  maiores que 40). É amplamente utilizado em muitas indústrias, especialmente em processos farmacêuticos e de polimerização (KRESTA et al., 2015).

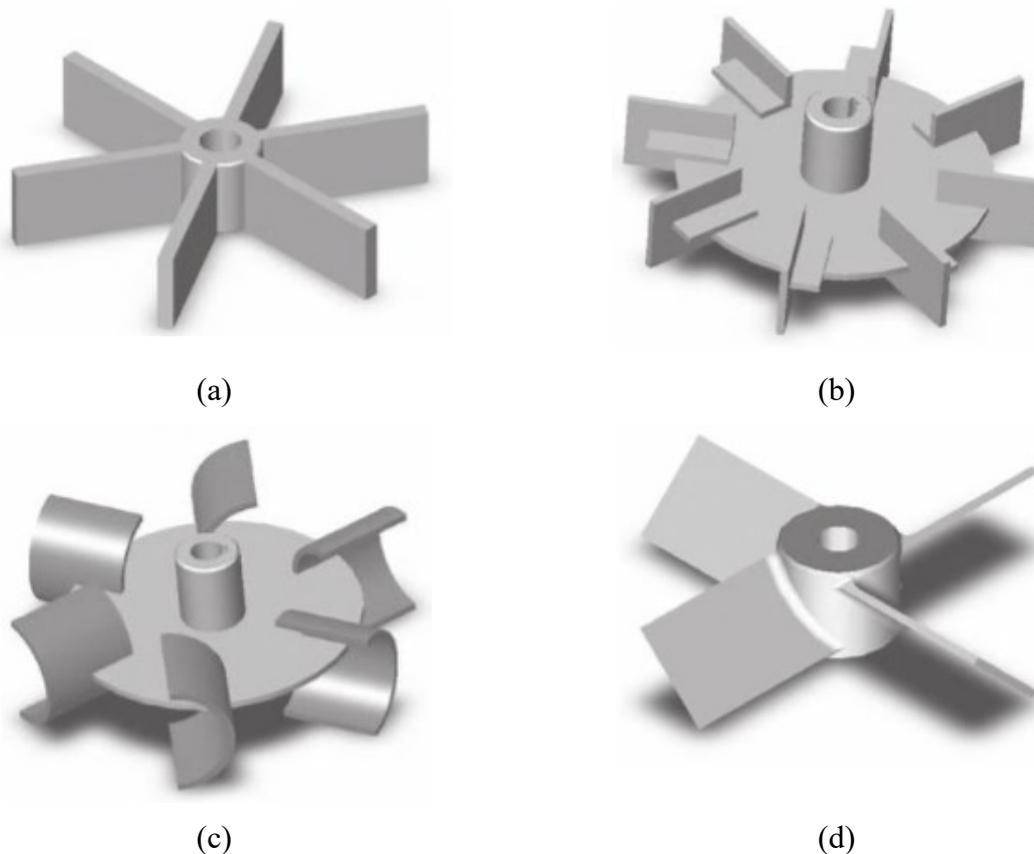
➤ **Turbinas:**

O fluido é dirigido de forma radial até o encontro com a parede do reator, onde há a divisão da corrente. Parte desta se dirige ao fundo e volta ao centro do rotor. A outra parte sobe até a superfície e volta ao rotor por cima na zona de sucção. Duas circulares distintas são geradas. Um ótimo fluxo radial e bons fluxos verticais são gerados. Apresentam boa eficiência quando, no processo, existe mistura de líquidos de mesma gravidade específica. Muito utilizado para suspensão de substâncias sólidas, agitação de fluidos viscosos ou de baixa viscosidade, dispersão de produtos gasosos em líquidos, mistura de fluidos imiscíveis e processos em que há transferência de calor (UHL e GRAY, 1966).

Uhl e Gray (1966) relatam que as turbinas são impelidores radiais que podem ser de **Pás Planas** (útil para alto cisalhamento, como em processos de emulsão líquido-líquido e suspensão de sólidos), de **Pás Curvas** (boa eficiência para escoamento radial e usado para processos em que há sensibilidade em relação à velocidade e quando altas rotações são exigidas para sucesso do sistema), **Rushton** (quando trabalhado com diminuídas concentrações de líquidos imiscíveis e produtos gasosos; há a formação de dois redemoinhos em cada pá, criando áreas de cisalhamento elevado e, assim sendo, quebrando gotas de diâmetro inferior), **Smith** (dispersão de elevados volumes de gases; não apresenta muita sensibilidade quando há variação no meio viscoso), **Pás Inclínadas** (atua bem tanto em regime laminar quanto em turbulento; adequado quando há mudança de viscosidade no meio e é usado para suspensão de sólidos).

A Figura 2.6 apresenta alguns dos principais impelidores turbina.

**Figura 2.6** – Turbinas: (a) Pás Planas, (b) Rushton, (c) Smith e (d) Pás Inclinadas.



Fonte: MCKEEN (2015)

➤ **Impelidores de Alto Cisalhamento:**

Operam em alta faixa de Número de Reynolds, com relação  $D/T$  baixa, velocidades altas e com áreas das pás pequenas. São caracterizados como impelidores de baixo fluxo e alta velocidade. São exemplos de **Impelidores de Alto Cisalhamento**, o *High Speed Disperser Blade*, o **Impelidor Contracorrente**, o **Disco**, o **Disco Modificado**, o **Cone Modificado** e a **Turbina Modificada** (UHL e GRAY, 1966). O **Rotor-Estator** também é tido como um impelidor de alto cisalhamento e, de acordo com Felton (2013), o princípio de operação deste tipo de equipamento envolve a passagem do fluido entre um estator e um rotor em alta velocidade (entre 2000 e 18000 RPM).

A Figura 2.7 apresenta alguns exemplos de impelidores de alto cisalhamento.

**Figura 2.7** – Impelidores de Alto Cisalhamento: (a) *High Speed Disperser Blade* e (b) Impelidor Rotor-Estator.



Fontes: (a) MCKEEN (2015) e (b) KOWALSKI, COOKE e HALL (2011)

### 2.1.4 Impelidores de proximidade (*close clearance impellers*)

São impelidores projetados para trabalhar com fluidos viscosos. Possuem diâmetros próximos ao do tanque. Os principais representantes deste tipo de impelidor são os dos tipos âncora e helicoidal, sendo o helicoidal de fita simples o mais comum (KRESTA et al., 2015).

Uma melhor mistura é observada quando há a utilização de impelidores de proximidade em fluidos viscosos. No caso do impelidor âncora, o uso de raspadores acoplados ao impelidor proporciona uma ação de raspagem da parede do tanque, que elimina ou, ao menos, impede que o fluido fique impregnado na parede devido à sua alta viscosidade, importante principalmente em operações de transferência de calor, como preparo de alimentos. O valor do *clearance* (distância entre impelidor e parede interna do tanque) é importante já que influencia no consumo de potência e na eficiência da transferência de calor (KRESTA et al., 2015).

Os impelidores de proximidade como os âncoras e os helicoidais são frequentemente usados em líquidos altamente viscosos, onde a mistura homogênea é importante para controlar o calor da reação (OLDSHUE, 1983).

A potência é influenciada pelo fluido, regime de escoamento e processo (JOAQUIM JR. et al. 2007).

Nos sistemas turbulentos (em que não se faz necessário um cisalhamento pronunciado) há a possibilidade do uso de agitadores âncoras e helicoidais. Assim sendo, em processos em que a mudança de viscosidade ocorre com facilidade, o uso destes impelidores

torna-se atraente. Apesar dos impelidores laminares fazerem uma boa mistura em aplicações turbulentas, eles geralmente não são recomendados devido aos altos custos de investimento (OLDSHUE, 1983).

#### 2.1.4.1 Impelidor Âncora

Usado para processos que envolvem elevadas viscosidades ( $4 \times 10^4$  à  $5 \times 10^4$  cP ou 40 à 50 Pa.s). A largura nominal da pá gira em torno de  $D/10$ . O consumo de potência varia diretamente com a relação  $H/D$  (altura/diâmetro). O impelidor âncora é uma boa escolha para operações de mistura com troca de calor para fluidos com viscosidade entre 5000-50000 cP. Quando trabalha-se com viscosidades abaixo de 5000 cP não há um suficiente arraste de viscosidade na parede do tanque para promover o bombeamento, resultando assim em uma condição chamada de “turbilhão”. Ao utilizar viscosidades superiores a 50000 cP, a capacidade de misturar e transferir calor decresce muito rapidamente assim como a capacidade de bombeamento, fazendo com que o impelidor apenas deslize no fluido (OLDSHUE, 1983; PAUL, ATIEMO-ONBENG e KRESTA, 2004).

Os impelidores âncora possuem um forte componente de velocidade tangencial e um fraco axial. Estes impelidores podem atuar como raspadores, fazendo com que a resistência convectiva interna diminua, elevando a transferência de calor (JOAQUIM JR. et al. 2007).

O Número de Potência dos impelidores âncoras depende do espaço existente entre o agitador e a parede do reator,  $c/T$ , e o Número de Reynolds. Independentemente da geometria do âncora, a modificação da distância entre a parede interna do tanque e a pá do impelidor (*clearance*) altera a curva de potência. Quanto maior for esta distância, menor tende a ser o consumo energético. Seguindo este raciocínio, é esperado um número de potência mais elevado quanto menor for a relação  $c/T$  (PAUL, ATIEMO-ONBENG e KRESTA, 2004).

O efeito da distância da parede pode também ser expresso matematicamente por diferentes regimes de fluxo (PAUL, ATIEMO-ONBENG e KRESTA, 2004).

Para fluxo laminar,  $Re < 30$ :

$$N_P \sim \left(\frac{c}{T}\right)^{-0,5} \quad (1)$$

Em que  $c$  é o *clearance* e  $T$ , o diâmetro do tanque.

Para condições de transição,  $30 < Re < 1000$ :

$$N_P \sim \left(\frac{c}{T}\right)^{-0,25} \quad (2)$$

A altura do braço da âncora ( $h$ ) também modifica o Número de Potência:

$$N_P \sim \left[0,89 \left(\frac{h}{D}\right) + 0,11\right] \quad (3)$$

Segundo Ho e Kwong (1973), impelidores âncora que se utilizam de raspadores, evitam que o fluido fique aderido ou impregnado nas paredes do tanque, garantindo uma melhoria na transferência de calor, uma vez que estes raspadores retiram o fluido com maior temperatura da parede do tanque e, pelo movimento, conduzem o fluido com menor temperatura à superfície “aquecida” do tanque.

A utilização de raspadores garante a elevação do consumo de potência ocasionado pelo atrito entre o raspador e a parede do tanque, no entanto, há um ganho em eficiência, já que a agitação é mais homogênea.

#### 2.1.4.2 Impelidor Helicoidal

O impelidor helicoidal age no sentido de promover a movimentação física do fluido do topo ao fundo do tanque. Um *pitch*,  $p$  (passo: distância entre linhas de fluxo – altura de uma “virada” da hélice) mais elevado faz com que exista uma redução da mistura do topo ao fundo, enquanto que um mais baixo provoca um excesso de fricção e consumo de energia (PAUL, ATIEMO-ONBENG e KRESTA, 2004).

É um impelidor que possui elevada aplicabilidade para variados materiais com alta viscosidade. Existem modelos com fita simples, simples com parafuso, fita dupla ou fita quádrupla. Quando analisado o de fita dupla, é possível visualizar as hélices internas e externas. As internas bombeiam descendentemente e as externas ascendentemente. Quando  $h_h$  (altura do impelidor) é elevado ou o *clearance* radial diminuído, há um aumento do Número de Potência -  $N_p$  (OLDSHUE, 1983).

O impelidor helicoidal é mais eficiente se comparado ao impelidor âncora. A ocorrência deste fato é atribuída à presença dos componentes tangencial e axial (JOAQUIM JR. et al. 2007).

### 2.1.5 Número de Reynolds

Silva (2002) expõe que o Número de Reynolds para impelidores apresenta uma relação entre as forças inerciais ( $F_i$ ) com as forças viscosas ( $F_v$ ) como pode ser melhor visualizado na equação abaixo:

$$R_e = \frac{F_i}{F_v} = \frac{\rho ND^2}{\mu} \quad (4)$$

Através desta equação pode-se verificar o tipo do fluxo/escoamento para tanques de mistura (sistemas com agitação). Quando o valor apresentado é menor que 10, o fluxo é laminar. Quando o resultado for superior a  $10^4$ , o fluxo é turbulento. O intervalo entre estes dois valores é uma faixa chamada de transição (SILVA, 2002; SPOGIS, 2002).

Alguns autores discordam em relação a esta faixa, considerando, por exemplo, que a faixa laminar abrange até 300 (EDWARDS e WILKINSON, 1972).

Machado et al. (2013) comentam também que a transição ao regime turbulento é a um número de Reynolds mais elevado.

É possível notar que, em valores baixos, o Número de Reynolds é dependente da viscosidade, destacando a predominância das forças viscosas. Em contrapartida, há predomínio das forças inerciais (determinadas pela densidade) quando os Números de Reynolds são mais elevados (SPOGIS, 2002).

### 2.1.6 Potência

Spogis (2002) relata que o principal custo de operação em sistemas que não existe troca térmica é aquele relacionado à energia aplicada ao eixo árvore. O autor também menciona que a mistura é intrinsecamente relacionada à energia dissipada por um impelidor, que transforma a energia mecânica oriunda do motor em energia cinética e dissipação turbulenta no meio de mistura. Quando trabalha-se com mistura, a potência relaciona-se com

a densidade do fluido, o cubo da velocidade de rotação e a quinta potência do diâmetro do impelidor, em que a constante de proporcionalidade é o Número de Potência.

Joaquim Jr. et al. (2007) explicam que o Número de Potência ( $N_p$ ) é como um coeficiente de arraste nos sistemas com agitação e fornece uma medida adimensional do requerimento de energia do impelidor para uma mistura.

Martini (2010) relata que o número de potência está diretamente relacionado à potência consumida pelo impelidor. Assim sendo, quanto maior seu valor, maior será o consumo de energia. Com a elevação do número de Reynolds, o número de potência decai até se tornar constante, no regime turbulento.

### 2.1.7 Desenvolvimento das relações de potência

Paul, Atiemo-Onbeng e Kresta (2004) relatam que o consumo de potência de um impelidor é uma função da velocidade do impelidor,  $N$ , do diâmetro,  $D$ , e do formato do impelidor, entre outros fatores como:

1. Propriedades físicas do fluido;
2. Tamanho e geometria do tanque, ou forma;
3. Localização relativa do impelidor no tanque;
4. Presença ou ausência de chicana, seu formato e localização.

Os autores ainda citam que se a potência de um impelidor qualquer é medida para diferentes velocidades de rotação, os dados resultantes indicam em um gráfico log-log uma inclinação igual a 3,0 sugerindo que:

$$P \sim N^3 \quad (5)$$

Se impelidores com diâmetros diferentes, mas com as mesmas relações geométricas e formato são utilizados no mesmo tanque, a potência varia com o diâmetro do impelidor a quinta potência:

$$P \sim D^5 \quad (6)$$

Ao combinar as relações 5 e 6 tem-se que:

$$P \sim N^3 D^5 \quad (7)$$

A potência do impelidor também varia diretamente com a densidade do fluido:

$$P \sim \rho \quad (8)$$

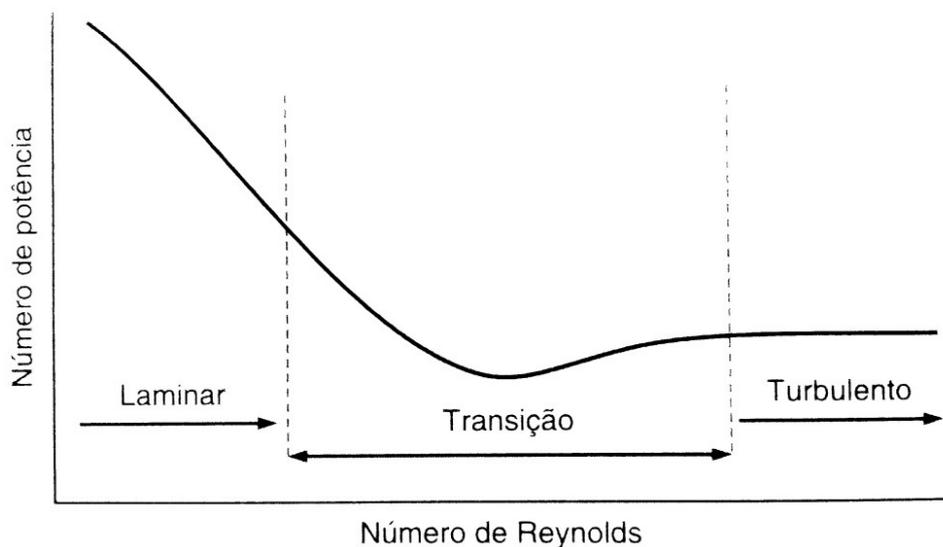
Combinando as relações 7 e 8, tem-se que:

$$P \sim N^3 D^5 \rho \quad (9)$$

### 2.1.8 Curvas de potência

Em um gráfico log-log de  $N_p$  x  $Re$ , que fornece uma típica curva de potência, Joaquim Jr. et al. (2007) mencionam que na região laminar, Números de Reynolds baixos (geralmente menores que 10), há dominância de forças viscosas e o coeficiente angular da curva de potência é -1, neste caso, indicando que  $N_p$  é inversamente proporcional a  $Re$ . Na faixa de transição, a curva apresenta uma não linearidade e por ser uma zona de transição gradual, a relação entre  $N_p$  e  $Re$  não é fácil de ser entendida. Na região denominada turbulenta,  $Re$  superiores a  $10^4$ , o escoamento é turbulento e a mistura é rápida. O  $N_p$  é essencialmente constante e independente da viscosidade. A Figura 2.8 exemplifica uma curva de potência delimitando os diferentes regimes.

**Figura 2.8** - Curva de potência elucidando regiões de diferentes regimes.



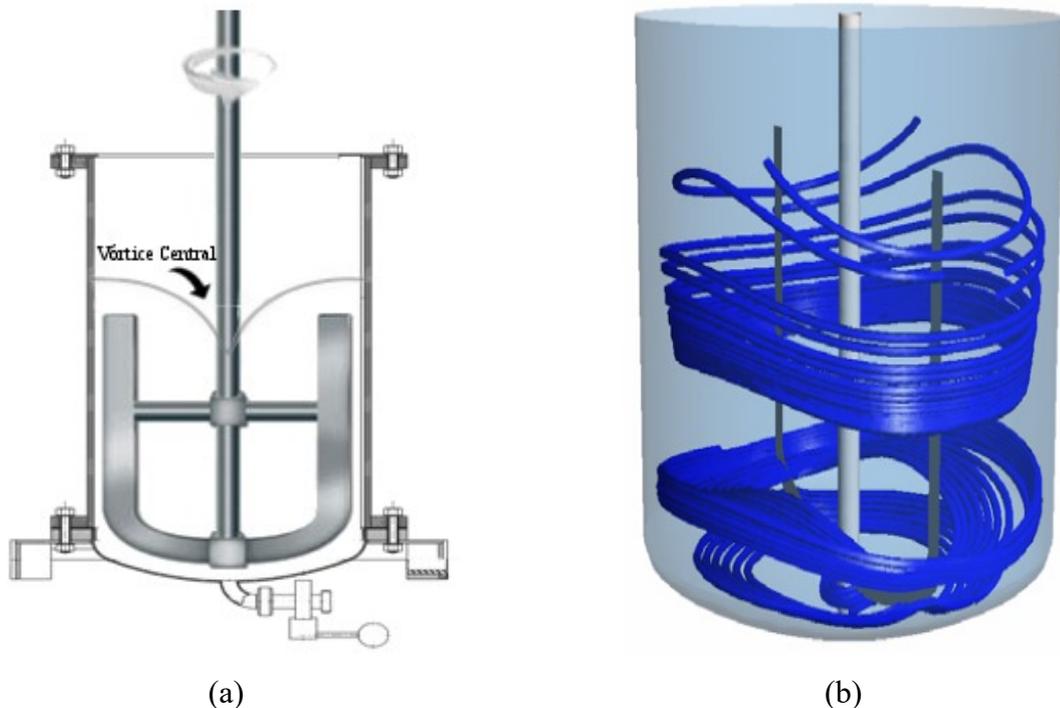
Fonte: JOAQUIM JR. et al. (2007)

### 2.1.9 Vórtice

Quando se trabalha com chicanas em tanques de agitação, há uma maximização da transferência de potência para o fluido e a minimização da “rotação sólida” do fluido, além de evitar que o ar entre no sistema através do vórtice. Na inexistência de chicanas, o vórtice pode então ser observado e o fluido se movimenta como um corpo sólido, apresentando um pequeno nível de mistura. Tal situação pode levar à classificação, estratificação e separação do sistema em diversas fases (JOAQUIM JR. et al., 2007).

O vórtice central gerado num tanque de mistura é representado na Figura 2.9.

**Figura 2.9** - (a) Representação do vórtice central num tanque de mistura e (b) vórtices formados por um impelidor âncora.



Fontes: (a) Elaborada pelo autor, (b) SPOGIS (2002).

Uhl e Gray (1966) mencionam que a formação do vórtice representa o balanceamento das forças gravitacionais e inerciais.

A formação de vórtice é causada pela falta de chicanas em arranjos de impelidores centralizados em tanques cilíndricos. Há então uma expulsão do fluido contra as paredes do tanque. Este redemoinho formado é oriundo da força centrífuga sobre o fluido e das tensões na superfície livre deste (SILVA, 2002).

Garavito (2013) relata que o vórtice pode se formar, dependendo das condições de potência e rotação, quando um impelidor é centralizado num tanque sem o uso de chicanas ou quando está muito próximo da superfície do líquido. Uma forma de evitar sua formação é descentralizar o impelidor.

Impelidores do tipo âncora, normalmente, operam em regime laminar e a formação de vórtices é reduzida (SPOGIS, 2002).

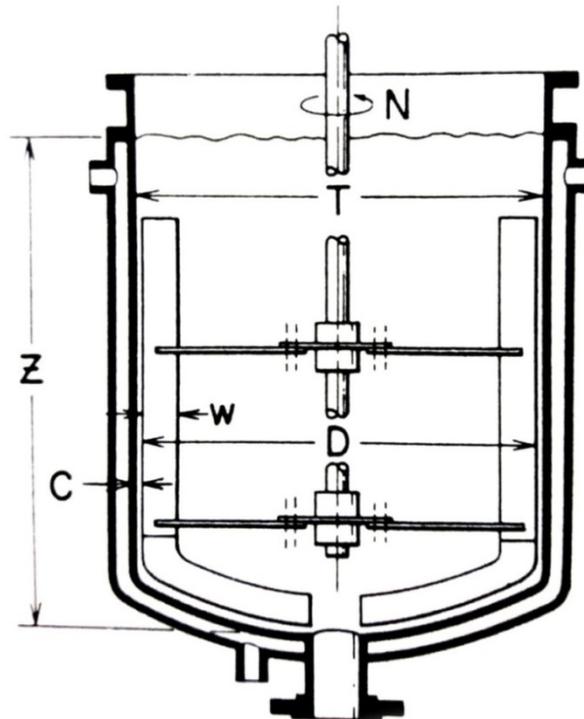
Não existindo chicanas, o efeito gravitacional é acentuado (FOUST et al., 1982).

Poucas pesquisas relacionam o efeito do vórtice ao consumo de potência num processo de agitação. Além disso, poucos destes estudos estão relacionados com impelidores helicoidais e âncoras.

### 2.1.10 Elementos do tanque

De acordo com Uhl e Gray (1966), algumas relações existentes num tanque padrão com um impelidor âncora podem ser visualizadas na Figura 2.10.

**Figura 2.10** – Relações presentes num tanque padrão com impelidor âncora.



$$\frac{Z}{T} = 0,50 - 1,26 \quad \frac{w}{D} = 0,05 - 0,13 \quad \frac{c}{D} = 0,01 - 0,08$$

Fonte: UHL e GRAY (1966)

Em que:

- N – Velocidade de Rotação: Velocidade utilizada pelo impelidor dentro do tanque;
- T – Diâmetro do Tanque: Utiliza-se para cálculos o valor do diâmetro interno do tanque. Sua dimensão é determinada pelo objetivo do projeto;
- D – Diâmetro do Impelidor: Um dos principais parâmetros no estudo de agitação e mistura. Seu tamanho pode influenciar o resultado final;
- Z – Nível ou Altura do Fluido: Também chamado de profundidade do fluido. É a distância compreendida entre o fundo do tanque e a superfície do líquido;
- w – Largura da Pá: Extensão tomada no sentido perpendicular ao comprimento da pá;
- c – *Clearance*: Distância entre a extremidade da pá da âncora e a parede do tanque.

De acordo com Paul, Atiemo-Onbeng e Kresta (2004), as relações geométricas recomendadas para impelidores âncora e helicoidal são mostradas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** - Relações geométricas recomendadas para os impelidores âncora e helicoidal.

<b>Relação Geométrica</b>	<b>Âncora e Helicoidal</b>
w/D	0,082
c/D	0,02
D/T	0,96

Fonte: PAUL, ATIEMO-ONBENG E KRESTA (2004).

## 2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Analisando a lei de potência, White e Brenner (1934) foram pioneiros ao estudarem e desenvolveram correlações empíricas. Os autores explanaram sobre possíveis vantagens na correlação de desempenho de impelidores utilizando análise dimensional e estudo de modelos.

Os estudos de White e Brenner (1934) foram aprimorados por Hixson e Luedeke (1937), que fizeram análises teóricas sobre diversos impelidores. Perceberam que deveria se utilizar o diâmetro do tanque como valor de comprimento característico. Para as análises,

foram realizadas modificações de alguns parâmetros como o grau de inclinação das pás, o nível do fluido e a distância entre o agitador e o fundo do tanque.

Hixson e Baum (1942) correlacionaram torque com o Número de Reynolds, utilizando para tal projeto um impelidor do tipo turbina de pás inclinadas imersa em fluidos de diferentes naturezas e viscosidades.

Uma comparação de dados foi realizada por Rushton (1946). Ele comparou os dados de White e Brenner (1934) com dados oriundos da *Mixing Equipment Corporation*.

As propriedades e o comportamento de muitos impelidores utilizados na indústria foram abordados e estudados por Rushton, Costich e Everett (1950). Os autores não consideraram as diferenças geométricas dos impelidores, nem encontraram efeito significativo da altura do fluido sobre o Número de Potência, mas desenvolveram consideravelmente o conceito deste número. Rushton, Costich e Everett (1950) levaram em conta a velocidade de rotação do impelidor, o diâmetro do tanque e a densidade do fluido para caracterizar o Número de Potência,  $N_p$  (que é adimensional):

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (10)$$

Nesta equação,  $P$  é a potência dada em Watts,  $\rho$  é a densidade do fluido dada em  $\text{kg/m}^3$ ,  $N$  é o número de rotações por segundo desenvolvida pelo impelidor (RPS) e  $D$  é o diâmetro do impelidor dado em metros.

Nagata, Yoshioka e Yokoyama (1955) estudaram um impelidor num tanque sem chicanas, conhecido como impelidor de duas pás retas. Verificaram a distribuição da velocidade angular do líquido agitado nas condições mencionadas. Os autores não perceberam qualquer efeito significativo relacionado à posição do impelidor no consumo de potência. Perceberam, sobretudo, que se o produto da largura da pá ( $w$ ) e o número de pás ( $np$ ) for igual para uma mesma constante  $K$ , os impelidores possivelmente terão iguais consumos de potência.

$$w (np) = K \quad (11)$$

Bates, Fondy e Corpstein (1963) estudaram parâmetros que influenciam na potência do impelidor. Consideraram as geometrias do tanque e do impelidor, largura e ângulo das pás, proximidade dos impelidores nos limites do sistema e o número de pás para

caracterizarem sua pesquisa. Utilizaram-se de uma variedade de impelidores de turbina de fluxo radial e axial para construir curvas de potência numa completa faixa de Número de Reynolds.

Os estudos de Nienow e Miles (1971) investigaram sobre números de potência para impelidores do tipo turbinas de disco retas e inclinadas a 45° e pás retas para Número de Reynolds superiores a  $2 \times 10^4$ . O efeito do tamanho do impelidor e o espaço acima da base do tanque foram relatados em detalhe. Também foi mostrado que os números de potência para turbinas de disco pequenas são extremamente sensíveis às mudanças na espessura do disco. Para turbinas de disco, os números de potência para tanques fechados são maiores do que para abertos.

Nagata (1975) estudou a potência consumida em um sistema sob agitação. Observou que elevando-se a largura das pás dos agitadores, ocorre um aumento da potência consumida e que quanto mais viscoso o fluido, mais significativo é esse aumento. Outro ponto analisado foi que o Número de Potência é influenciado por variáveis como inclinação das pás e altura da superfície do fluido e pelo Número de Reynolds. Segundo Nagata (1975), alterar verticalmente a posição do impelidor dentro do tanque (variar a distância entre o impelidor e o fundo do tanque), não modifica significativamente a potência consumida. O método de determinação de potência e torque utilizado pelo autor é relativamente simples e até mesmo por este fato apresenta certas imprecisões e desvios oriundos de erros experimentais.

Alguns pesquisadores relataram que o impelidor de pás retas inclinadas a 45° formado por 4 pás é o agitador de fluxo axial mais utilizado no mundo (JOAQUIM JR. et al., 2007; BOWEN, 1985; GATES, HENLEY E FENIC, 1975).

Novak, Ditl e Rieger (1982) verificaram que a posição do impelidor no tanque influenciava na potência consumida. O estudo foi realizado com tanques cilíndricos de diferentes fundos (reto, curvo e cônico) e com impelidores do tipo Turbina de 3 e 6 pás. Utilizaram a mesma altura do líquido e diâmetro do tanque e variaram mais algumas configurações como, por exemplo, a altura vertical do impelidor em relação ao fundo do tanque.

Chudacek (1985) teve por objetivo em seu trabalho mostrar que o Número de Potência é dependente do *clearance* (distância entre impelidor e tanque), diâmetro e altura do tanque e formato de seu fundo e da geometria das pás do impelidor. Descreveu as relações entre a geometria e a potência do tanque e analisou algumas tendências observadas. Teve o propósito de disponibilizar tabelas de dados mais precisos de números de potência para

o tanque de fundo chato e geometrias alternativas e também de comparar valores do Número de Potência observados com os dados de estudos anteriores.

Impelidores de pás retas e do tipo turbina foram estudados por Sano e Usui (1985). Estes pesquisadores forneceram dados de números de potência para os impelidores citados em tanques com chicanas para Número de Reynolds superior a  $5 \times 10^5$ . Além disso, os autores variaram algumas dimensões dos impelidores (como  $D/T$ ,  $w/D$  e número de pás) e do tanque. Utilizaram um torquímetro posicionado sobre o eixo para a realização das medições.

Hockey, Nouri e Pinho (1989) relataram que o Número de Reynolds e as características não-newtonianas do fluido fazem variar o perfil do fluxo criado pelos impelidores. Ao alterar estes perfis de fluxo há indicativos de que os impelidores têm a chance de apresentar um desempenho fraco em certos intervalos de operação.

O sucesso da agitação depende, entre outros fatores, do tipo de impelidor. Mas na análise final, alguns fatores devem ser levados em conta para que o processo como um todo origine um produto final com a qualidade e custo almeçados. Um dos fatores que entram neste cálculo de custo benefício é a potência do impelidor. Esta potência necessária para que a agitação ocorra de forma satisfatória sofre influência da geometria das pás do impelidor, segundo Razuk (1992). Uma constatação feita pelo trabalho deste autor é de que menos potência é requerida quanto maior a inclinação das pás em relação com a vertical. O Número de Reynolds influencia também nesta afirmação: quanto menores são os valores de Número de Reynolds, menor a importância da inclinação das pás sobre a potência gasta.

Kresta e Wood (1993) trabalharam com impelidores de pás inclinadas e observaram que alguns fatores geométricos possuem influência considerável na circulação e no bombeamento do fluxo num tanque de mistura. Este fato, assim sendo, consegue explicar a ascensão da fabricação de muitos impelidores de fluxo axial para as mais variadas utilizações.

Wu e Pullum (2000) relataram um cálculo preditivo do Número de Potência usando teoria de elemento de pá em combinação com coeficientes de arraste. Os autores conseguiram modelar os efeitos do ângulo, espessura, curvatura e número de pás no desempenho do impelidor.

### **2.2.1 Literaturas relacionadas ao projeto**

Beckner e Smith (1966), em seus trabalhos com impelidores âncora, sugeriram a seguinte relação de potência:

$$N_P = 82 \left( \frac{ND^2\rho}{\mu} \right)^{-0,93} \left( \frac{c}{T} \right)^{-0,25} \quad (12)$$

Em que N é o número de rotações por segundo (RPS), D é o diâmetro do impelidor em metro,  $\rho$  é a densidade dada em  $\text{kg/m}^3$ ,  $\mu$  é a viscosidade em Pa.s, c (*clearance*) é a distância entre o impelidor e a parede interna do tanque em metro e T é o diâmetro do tanque em metro.

Hall e Godfrey (1970) analisaram potência utilizando cinco agitadores helicoidais. Alguns parâmetros foram levados em conta neste estudo como o distanciamento entre o impelidor e a parede do reator e o efeito que ocorre com a modificação da altura e largura das pás. No trabalho, o hidroxipropil metil celulose e o xarope de milho diluídos foram utilizados como fluidos. Após a rodada de testes, curvas de  $N_P \times Re$  foram plotadas. Através do Número de Reynolds e da geometria do agitador, uma equação para o Número de Potência para impelidores helicoidais foi proposta:

$$N_P = 66 Re_a^{-1} \left( \frac{p}{D} \right)^{-0,73} (N_R) \left( \frac{h_h}{D} \right) \left( \frac{w}{D} \right)^{0,5} \left( \frac{c}{D} \right)^{-0,6} \quad (13)$$

Visualiza-se na equação anterior que alguns parâmetros importantes são correlacionados para que o valor de Número de Potência ( $N_P$ ) seja melhor apresentado. Tem-se a relação entre o Número de Reynolds aparente ( $Re_a$ ), o passo (*pitch* – distância entre linhas de fluxo) do impelidor (p), o diâmetro do impelidor (D) o número de fitas do impelidor ( $N_R$ ), a altura do impelidor ( $h_h$ ), a distância entre o impelidor e a parede do tanque - *clearance* (c), a largura da fita (w). Com exceção do  $Re_a$  e do  $N_R$  (que são adimensionais), os outros parâmetros são dados em metros.

Sawinsky, Havas e Deak (1976), em seus estudos, mediram potência para impelidores do tipo âncora e helicoidal utilizando fluidos newtonianos e pseudoplásticos. O número de potência para fluidos newtonianos é a seguir relacionado:

$$N_P = \frac{17}{Re} \left( \frac{21 + D}{D} \right) \left( \frac{T}{c} \right)^{0,45} \quad (14)$$

Na relação apresentada,  $D$  é o diâmetro da âncora,  $T$  é o diâmetro do tanque e  $c$  é o *clearance* – distância entre parede interna do tanque e a pá do impelidor (dados em metros).

Chowdhury e Tiwari (1979) mediram a potência consumida em agitadores helicoidais do tipo fita-parafuso em regime laminar e visualizaram que esta potência se elevava à medida que a velocidade de rotação também aumentava. Relataram também que o consumo de energia apresentou-se linearmente proporcional à profundidade do líquido. Os autores compararam os dados obtidos com os de outros pesquisadores.

Takahashi et al. (1982) obtiveram, empiricamente, o perfil do fluxo de agitação para diversas configurações de impelidores do tipo helicoidal, utilizando para tal projeto, cápsulas de cristal líquido e um dispositivo que emite luz através do tanque e a recebe através de uma câmera após sua passagem pela solução de glicose de milho e água com a partícula marcadora de cristal líquido.

Edwards e Shamlou (1989) propuseram uma Correlação para obter o Número de Potência para impelidores âncora:

$$N_p = 8,5\pi^3 \frac{\left(\frac{h}{D}\right) \left(\frac{w}{D}\right)}{(Re) \left(\frac{c}{T}\right)^{0,5}} np \quad (15)$$

Os autores perceberam que o  $N_p$  correlaciona-se com o diâmetro da âncora ( $D$ ) e do tanque ( $T$ ), a altura da haste da âncora submersa ( $h$ ), a largura da haste ( $w$ ), a distância entre a âncora e o tanque - *clearance* ( $c$ ), dados em metros, e o número de braços do impelidor ( $np$ ).

Carreau, Chhabra e Cheng (1993) estudaram a influência da reologia sobre a potência consumida em impelidores helicoidais. Foram utilizados seis impelidores deste tipo com configurações diferentes para os propósitos do projeto. Utilizaram em seus estudos, soluções aquosas de xarope de milho e glicerol, como fluidos newtonianos, e carboximetil celulose e goma xantana, usados em contrapartida como fluidos não-newtonianos.

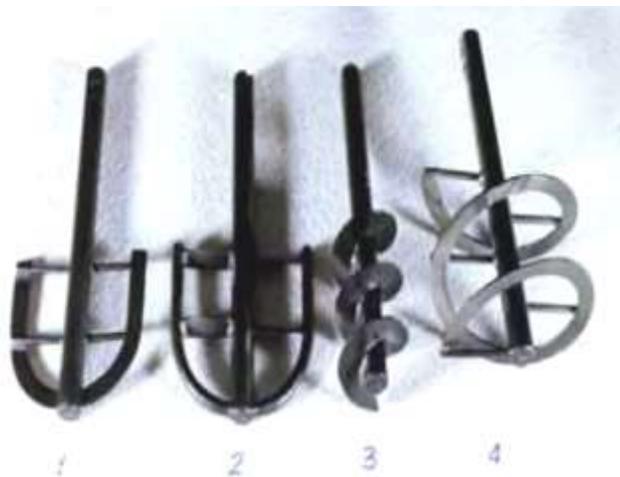
Cheng e Carreau (1994) estudaram a agitação no regime de transição para impelidores do tipo helicoidal. Os fluidos utilizados para os experimentos foram soluções de glicose de milho e água; água e CMC; glicerol, água e goma xantana.

Battaglini (1998) relata que impelidores especiais como dos tipos parafuso, âncora e fita helicoidal são muito utilizados em processos de agitação e mistura de fluidos de elevada viscosidade. No entanto, impelidores do tipo âncora com raspadores tem sido utilizados em

tanques com fluidos de baixa viscosidade com o intuito de raspar a superfície de troca térmica e/ou diminuir a resistência convectiva interna, elevando, desta forma, a transferência de calor.

Battaglioni (1998) utilizou âncoras modificadas e convencionais, além de fita helicoidal e parafuso em seus estudos de consumo de potência. O trabalho estudou tanques com fundos toro esférico e reto, amplamente usados na indústria. A Figura 2.11 explicita os impelidores utilizados no trabalho.

**Figura 2.11** – Impelidores utilizados por BATTAGLINI (1998): 1 – âncora convencional; 2 - âncora modificada; 3 - parafuso 4 - fita helicoidal.



Fonte: BATTAGLINI, 1998

Wang et al. (1999) estudaram a potência consumida em impelidores do tipo helicoidal em fluidos Newtonianos (xarope de milho) e não-Newtonianos. A dissolução de carboximetilcelulose em xarope de milho atuou como fluido pseudoplástico neste estudo.

De acordo com Paul, Atiemo-Onbeng e Kresta (2004), o Número de Potência para agitadores helicoidais depende do Número de Reynolds,  $Re$ ; distância entre a parede do tanque e a pá,  $c$ ; altura da pá,  $h_h$ ; *pitch* (altura de uma “virada” da hélice),  $p$ ; largura da pá,  $w$ ; número de hélices,  $n$  e diâmetro do impelidor,  $D$ . Com exceção de  $Re$  e  $n$  (adimensionais), os outros parâmetros são dados em metros. Os autores sugerem a relação a seguir para o cálculo do Número de Potência para impelidores helicoidais:

$$N_P = \frac{150 h_h}{Re D} \sqrt{\frac{n}{\frac{p}{D} \left(\frac{c}{w}\right)^{0,67}}} \quad (16)$$

A Tabela 2.2 apresenta as principais correlações mencionadas.

**Tabela 2.2** - Principais correlações.

Autores	Correlação
RUSHTON, COSTICH e EVERETT (1950)	$N_P = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$
BECKNER e SMITH (1966)	$N_P = 82 \left( \frac{Nd^2 \rho}{\mu} \right)^{-0,93} \left( \frac{c}{T} \right)^{-0,25}$
HALL e GODFREY (1970)	$N_P = 66 Re_a^{-1} \left( \frac{p}{D} \right)^{-0,73} (N_R) \left( \frac{h_h}{D} \right) \left( \frac{w}{D} \right)^{0,5} \left( \frac{c}{D} \right)^{-0,6}$
SAWINSKY, HAVAS e DEAK (1976)	$N_P = \frac{17}{Re} \left( \frac{21 + D}{D} \right) \left( \frac{T}{c} \right)^{0,45}$
EDWARDS e SHAMLOU (1989)	$N_P = 8,5 \pi^3 \frac{\left( \frac{h}{D} \right) \left( \frac{w}{D} \right)}{(Re) \left( \frac{c}{T} \right)^{0,5}} np$
PAUL, ATIEMO-ONBENG e KRESTA (2004)	$N_P = \frac{150 h_h}{Re D} \sqrt{\frac{n}{\frac{p}{D} \left( \frac{c}{w} \right)^{0,67}}}$

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

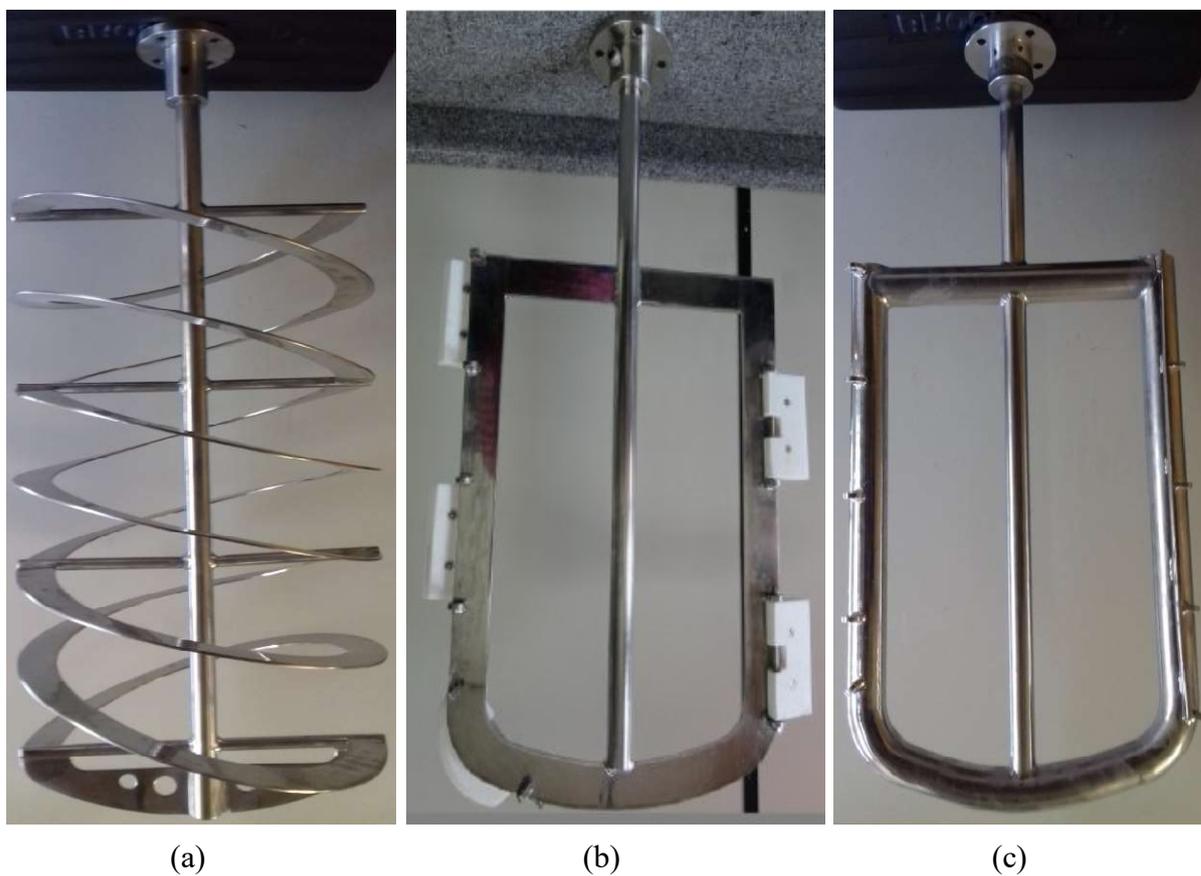
---

---

#### 3.1 MATERIAIS

A Figura 3.1 abaixo apresenta os impelidores utilizados no projeto.

**Figura 3.1** – Impelidores utilizados no projeto: (a) Helicoidal, (b) Âncora de pás retas e (c) Âncora de perfil tubular.



A Tabela 3.1 a seguir, indica os impelidores utilizados com suas respectivas dimensões e características.

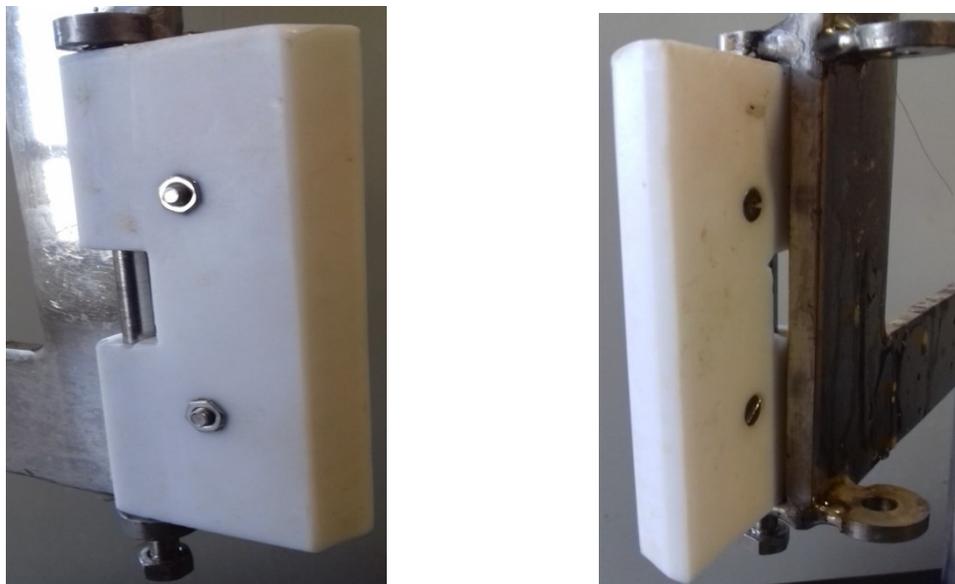
**Tabela 3.1** - Dimensões e características dos impelidores utilizados.

<b>Impelidor</b>	<b>Material</b>	<b>Diâmetro, D (cm)</b>	<b>Altura, h (cm)</b>	<b>Largura da Pá, w (cm)</b>	<b>Passo, p (cm)</b>
Helicoidal	Aço Inoxidável	36,0	86,0	4,0	20,0
Âncora Reta	Aço Inoxidável	34,5	50,0	3,9	-
Âncora Tubular	Aço Inoxidável	34,5	50,0	3,9	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

➤ Raspadores de Teflon com molas: são posicionados nos impelidores âncoras de forma diagonal, visando o equilíbrio de massas (evitar o desbalanceamento) e a raspagem de uma maior área do tanque. Seu uso tende a elevar o consumo de energia, no entanto, são essenciais para sistemas com fluidos de elevadas viscosidades;

A Figura 3.2 mostra os raspadores de teflon utilizados no estudo.

**Figura 3.2** – Raspadores de teflon utilizados nos impelidores âncoras.

➤ Viscosímetro Brookfield® LVDV-I Prime;

A Figura 3.3 apresenta o viscosímetro e os *spindles*<sup>2</sup> usados no projeto.

**Figura 3.3** – Equipamentos auxiliares utilizados: (a) Viscosímetro e (b) *spindles*.



(a)



(b)

- Torquímetro Magtrol<sup>®</sup>;
- Planta-piloto de agitação, obtida com o projeto FAPESP 03/08640-7;
- Glicose de milho (produto Excell<sup>®</sup> 1040 da Corn Products<sup>®</sup>);
- Água;

A Tabela 3.2 demonstra os programas utilizados para a programação dos parâmetros dos testes, acionamento do motor e coleta de dados:

---

<sup>2</sup>*Spindles*: sensores de cisalhamento. São de diferentes tamanhos e áreas superficiais. Itens que se acoplam ao viscosímetro para medir a viscosidade de fluidos em uma específica faixa: os de menor diâmetro, as maiores viscosidades; os de maior diâmetro, as menores viscosidades.

**Tabela 3.2** - Programas utilizados no projeto.

<b>Programa</b>	<b>Empresa</b>	<b>Responsável pela</b>
MT-MANAGER <sup>®</sup>	SEW <sup>®3</sup>	Programação dos parâmetros dos testes e acionamento do motor.
MOVITOOLS <sup>®</sup> 4.10	SEW <sup>®</sup>	Medição dos parâmetros elétricos do inversor de frequência.
TORQUE <sup>®</sup> 1.0	MAGTROL <sup>®</sup>	Coleta do torque, potência mecânica e velocidade de rotação apresentados pelo torquímetro.

Fonte: Elaborada pelo autor.

As informações são obtidas com o auxílio do torquímetro que fica situado dentro de uma caixa localizada entre o motor e o eixo. Uma caixa com *display* é externamente ligada ao equipamento. O TORQUE<sup>®</sup> 1.0 emite dados a cada fração de segundo, acarretando em um montante elevado de registros. Este programa tem compatibilidade com o Excel<sup>®</sup>, permitindo que os dados sejam planilhados, tratados e plotados.

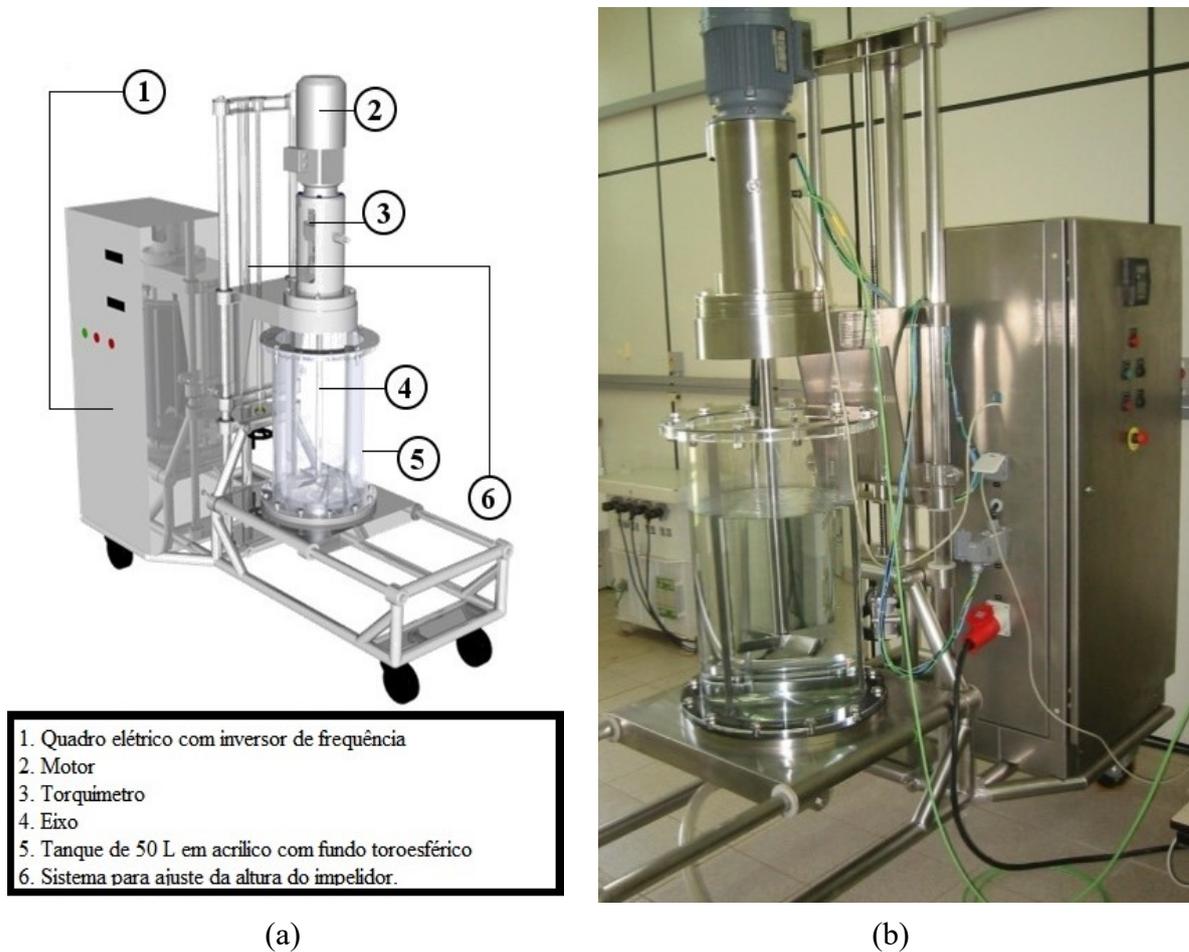
### 3.1.1 Planta-piloto de agitação

O sistema do projeto é composto por um tanque de 50 L com fundo toro esférico em acrílico, eixo rotacional ligado a um torquímetro, sistema direcional que atua no sentido de posicionar tanque e agitador, leitor de torque com respectiva conversão de potência, painel elétrico com inversor de frequência e programas que realizam a coleta e conversão dos registros em dados.

A planta-piloto de agitação pode ser melhor observada através das imagens apresentadas na Figura 3.4.

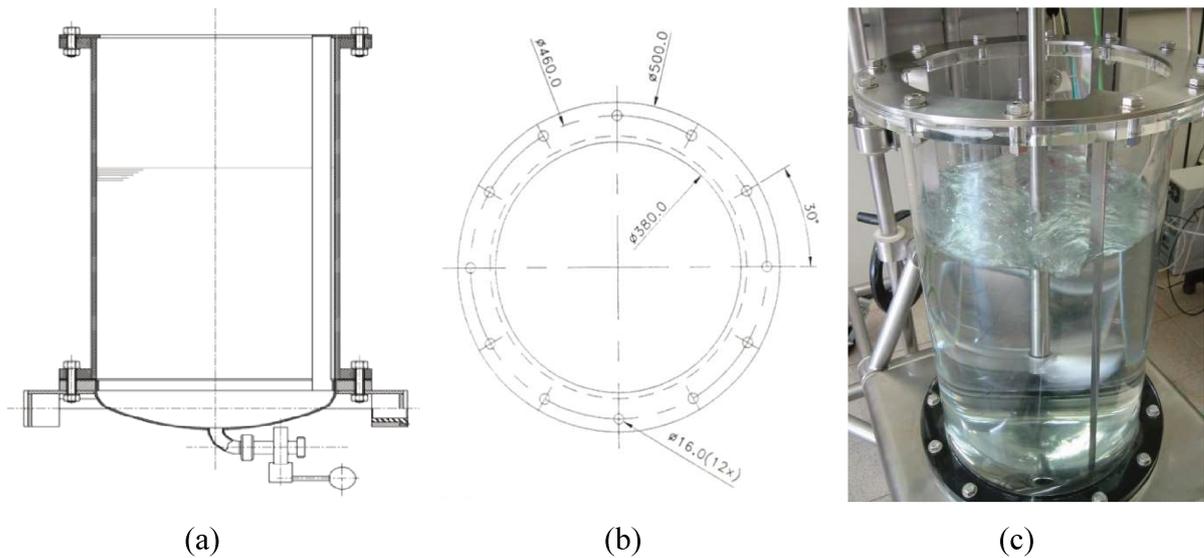
<sup>3</sup>SEW: É a abreviação de *Süddeutsche-Elektromotoren-Werke*. Traduzindo do alemão, significa Fábrica de Motores Elétricos do Sul da Alemanha.

**Figura 3.4** – (a) Representação da planta-piloto de agitação do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional e (b) foto real da mesma.



O diâmetro interno do tanque é de 380 mm com altura de 760 mm. O fundo é toro esférico 10%. A representação do tanque é apresentada a seguir na Figura 3.5.

**Figura 3.5** - Representação do tanque reacional: (a) vista frontal, (b) vista superior e (c) foto real.



O processo de coleta de dados de torque e a consequente obtenção de dados de potência foi realizado por dois meios. O intuito da utilização de dois métodos é o de assegurar uma maior eficiência na obtenção dos dados experimentais. São eles:

➤ **Torquímetro (transdutor de torque):** Através deste equipamento, há a coleta do torque utilizado no teste. Tal instrumento é ligado a um visor digital que, por sua vez, está conectado ao computador. Todo sinal que é coletado pelo equipamento é transmitido para o programa específico (TORQUE<sup>®</sup>). A partir daí, o torque é convertido em potência. O equipamento apresenta um maior grau de detalhes em sua exposição de dados, já que trabalha com um montante elevado de valores oriundos dos resultados capturados em frações de segundo. Tais dados podem ser armazenados para futuro tratamento. Há a possibilidade de visualizar os dados no instante que são capturados;

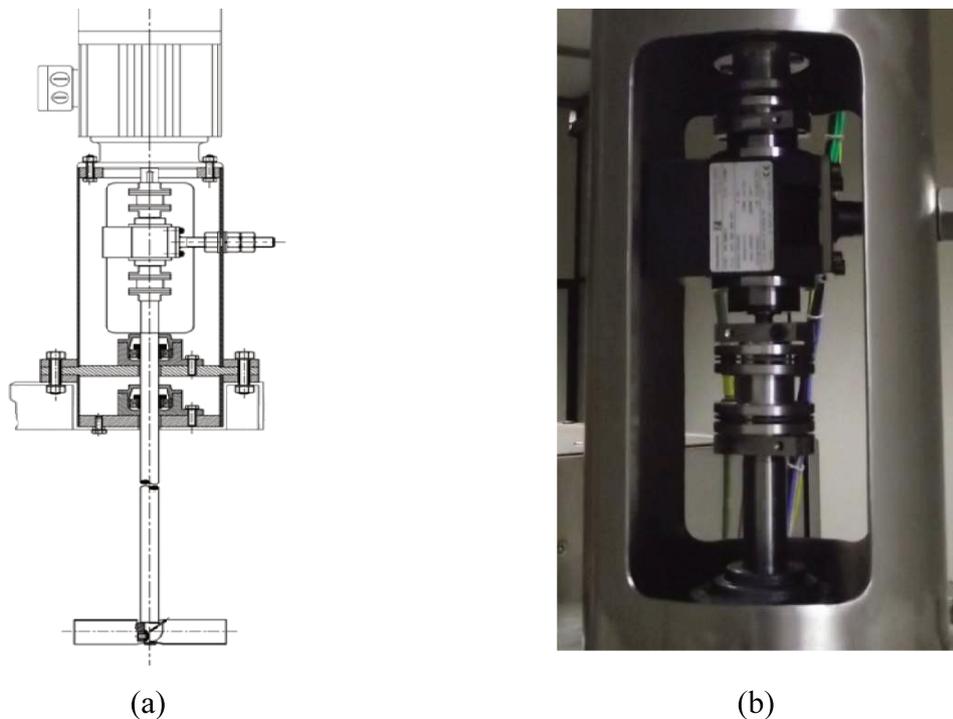
➤ **Inversor de frequência (parâmetros elétricos):** O inversor também exibe variadas respostas para a mesma faixa de rotação e trabalha com muitos dados como o torquímetro (também em fração de segundo). No entanto, os dados não podem ser armazenados. O inversor elétrico é o principal item do quadro elétrico da planta piloto e tem-se que os dados de amperagem e tensão são obtidos através deste quadro. O inversor é conectado ao computador por meio de uma saída do tipo serial e gera sinais elétricos *online* que, através do programa MOVITOOLS<sup>®</sup>, se convertem em valores de potência e torque. Além disso, o inversor de frequência também considera o consumo de potência do motor e

eixo, elevando os valores apresentados. Os maiores valores apresentados via programa foram coletados para cada velocidade de rotação. Também é possível visualizar os dados no momento que são capturados.

Ao utilizar duas vias para obtenção dos dados, há um aumento da qualidade destes, uma vez que a concordância entre os dados obtidos assegura uma maior confiança nos resultados.

A Figura 3.6 explicita a representação esquemática do torquímetro e sua foto real.

**Figura 3.6** – (a) Representação do torquímetro posicionado no eixo do impelidor e (b) foto real do aparelho.



O visor digital apresenta os valores capturados da potência, torque e velocidade de rotação, instantaneamente.

A Figura 3.7 demonstra a caixa com o visor digital e sua real localização junto ao computador no Laboratório de Fluidodinâmica Computacional - L-CFD.

**Figura 3.7** – (a) Visor digital indicando valores de potência, torque e velocidade de rotação e (b) disposição do equipamento e do computador.



(a)



(b)

A Figura 3.8 expõe o quadro elétrico com seu respectivo inversor de frequência.

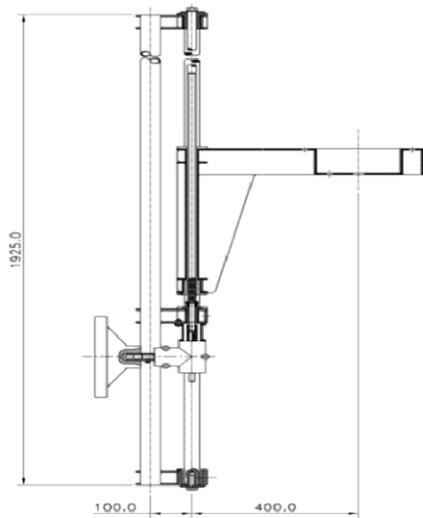
**Figura 3.8** - Quadro elétrico com inversor de frequência da planta-piloto do L-CFD.



O sistema tem a flexibilidade de ser readequado conforme as demandas de cada estudo. A disposição da base do tanque e a altura do agitador podem ser modificadas.

A Figura 3.9 mostra o local do Sistema onde a altura do agitador pode ser modificada.

**Figura 3.9** – (a) Vista lateral da porção responsável pela alteração de altura do impelidor e (b) foto real.



(a)



(b)

### 3.2 MÉTODOS

A glicose de milho (45,5 L) e a água (4,5 L) foram inseridas e homogeneizadas previamente no tanque para a obtenção da mistura glicose-água (fluido newtoniano estudado). Após esta ação, os impelidores foram posicionados de tal forma que a distância existente entre a parede do tanque e o impelidor também fosse observada no fundo do vaso (manutenção do *clearance* em toda extensão do tanque). Para o impelidor helicoidal esta distância foi de 1 cm. Para os impelidores âncoras, o *clearance* foi de 1,75 cm. No caso da utilização dos raspadores (impelidores âncoras reto e tubular), o contato com a parede era almejado.

Após o posicionamento correto do agitador, a chave de força foi devidamente acionada e, num segundo momento, foram ligados os disjuntores.

No computador, os *softwares* MT-MANAGER<sup>®</sup> e TORQUE<sup>®</sup> 1.0 foram ativados, sincronizados e os parâmetros necessários foram configurados. Entre estes parâmetros estão o tempo do teste (definido em 30 minutos), as velocidades de rotação inicial (5 RPM) e final (dependente de cada configuração testada) e a rampa de aceleração (de 5 em 5 RPM).

Assim que todos os ajustes foram realizados, foi a vez de ligar o motor para que os registros fossem capturados e armazenados.

Vale acrescentar que foi realizado um teste em vazio (sem a presença de fluido) para que os valores de potência do vazio fossem subtraídos dos valores coletados com a presença do fluido, descontando o efeito do eixo sobre a potência do impelidor. O teste em

vazio foi realizado com todos os impelidores do projeto e em todas as rotações (de 5 em 5 RPM até a velocidade final para cada configuração testada).

Outro ponto a ser considerado é que cada impelidor foi testado em triplicata, garantindo uma melhor precisão dos dados obtidos.

Após o término dos testes, as médias das triplicatas foram calculadas e utilizadas para o cálculo do  $N_p$  daquele impelidor. Juntamente com a obtenção do Número de Reynolds foi possível traçar curvas de potências para os diferentes impelidores.

### 3.2.1 Configurações para o regime laminar

Para que se consigam baixos Números de Reynolds é necessário que se procure um líquido que possua uma viscosidade elevada. A água, por apresentar baixa viscosidade, não é recomendada para este tipo de estudo, fazendo-se necessária a procura por outra substância. A glicose de milho é um líquido de altíssima viscosidade quando na sua forma pura. Para que o projeto viesse a ser desenvolvido e para que a viscosidade ideal para simular um regime laminar fosse atingida, foi necessária a diluição do produto em água. Possivelmente, o uso do produto puro não proporcionaria a obtenção de nem mesmo um número de Reynolds no regime laminar.

Assim sendo, a rotação máxima para o regime laminar teve como limitadores o máximo que o torquímetro podia quantificar e o máximo que o motor podia operar. Por mais que se elevasse a rotação via *software*, a velocidade apresentada e o valor de potência permaneciam constantes.

As máximas rotações que puderam ser desenvolvidas são explicitadas na Tabela 3.3 abaixo:

**Tabela 3.3** - Máximos valores de RPM para os impelidores testados no regime laminar.

<b>Impelidor</b>	<b>RPM Máximo</b>
<b>Âncora Tubular com Raspador (ATR)</b>	<b>40</b>
<b>Âncora Tubular Sem raspador (ATS)</b>	<b>70</b>
<b>Âncora Reta com Raspador (ARR)</b>	<b>30</b>
<b>Âncora Reta Sem raspador (ARS)</b>	<b>70</b>
<b>Helicoidal (H)</b>	<b>35</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que a presença de raspadores diminui significativamente a rotação máxima atingida, já que além da viscosidade, os raspadores também criam, em contato com a parede do tanque, uma força de atrito contrária ao movimento, limitando a capacidade de rotação do motor, elevando o torque.

### 3.2.2 Estudo da melhor concentração da mistura

Maiores viscosidades acarretam em menores rotações do equipamento utilizado. Assim sendo, poucos dados poderiam ser coletados e o estudo não ficaria tão completo. Paralelamente, foi realizado um cálculo prévio, utilizando a equação do número de Reynolds, para estimar qual faixa de viscosidade seria ideal para obter valores aceitáveis na região do laminar. Com esta faixa de viscosidade estimada foi possível, através dos resultados experimentais obtidos em bancada, verificar qual seria a melhor concentração da mistura. Com isso, a melhor mistura para os fins almejados no projeto foi aquela em que 91% de glicose foram misturadas com 9% de água, atingindo uma viscosidade de 7500 cP. Nesta viscosidade, é possível coletar dados significativos na região do regime laminar.

Utilizando os parâmetros do processo, consegue-se obter dados para o estudo de um regime laminar para a mistura glicose-água.

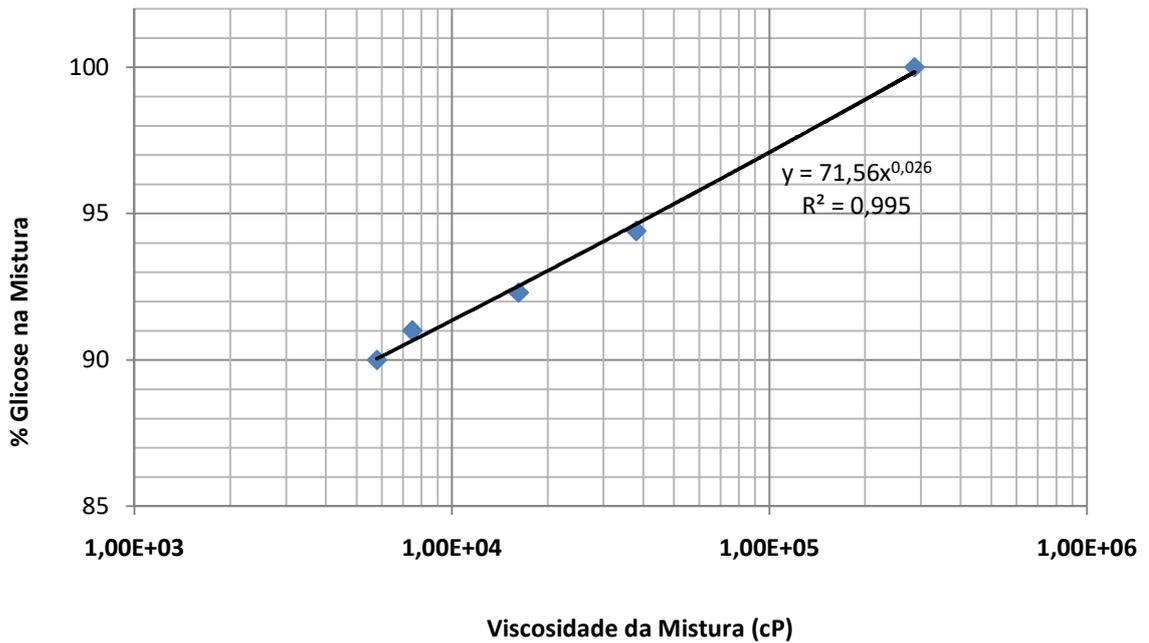
A Tabela 3.4 mostra os ensaios feitos, com as devidas porcentagens de glicose utilizadas nas diluições e as viscosidades apresentadas.

**Tabela 3.4** - Percentual de glicose em água e suas respectivas viscosidades.

<i>Spindle</i>	RPM	% Glicose	% Água	Viscosidade (cP)
S64	5	90,0	10,0	5800
<b>S64</b>	<b>5</b>	<b>91,0</b>	<b>9,0</b>	<b>7500</b>
S64	5	92,3	7,7	16200
S64	5	94,4	5,6	38000
S64	2	100,0	0,0	286000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para elucidar melhor esta constatação o Gráfico 3.1 foi elaborado.

**Gráfico 3.1** - Viscosidade observada com a elevação da porcentagem de glicose à mistura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da observação do Gráfico 3.1 percebe-se claramente que o incremento de água à glicose diminui exponencialmente a viscosidade do fluido. Outro ponto que chama a atenção e ajuda a explicitar o último comentário é o fato de que de 100% para 94,4% de glicose (diminuição de apenas 5,6%) a viscosidade caiu de 286000 cP para 38000 cP (cerca de 7,5 vezes menos viscoso).

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

---



---

#### 4.1 CONFIRMAÇÃO DO CARÁTER NEWTONIANO DA MISTURA

Para que o fluido seja caracterizado como Newtoniano, a curva do gráfico de Torque x Velocidade de Rotação necessita possuir um perfil linear, passar pela origem (0,0) e a tensão de cisalhamento deve ser diretamente proporcional à taxa de deformação. É possível transformar, matematicamente, as leituras de velocidade de rotação e torque em valores de taxa de deformação e tensão de cisalhamento, respectivamente (MITSCHKA, 1982).

O projeto em questão verifica o consumo de potência de diferentes impelidores utilizando líquido de alta viscosidade e com caráter Newtoniano. Para se ter esta comprovação foi necessário o uso do viscosímetro. Através dele e do uso de um *spindle* ideal para a viscosidade em questão, dados de torque (em %) foram coletados para diferentes velocidades de rotação (em RPM). A Tabela 4.1 expõe os dados de Torque e Velocidade de Rotação coletados.

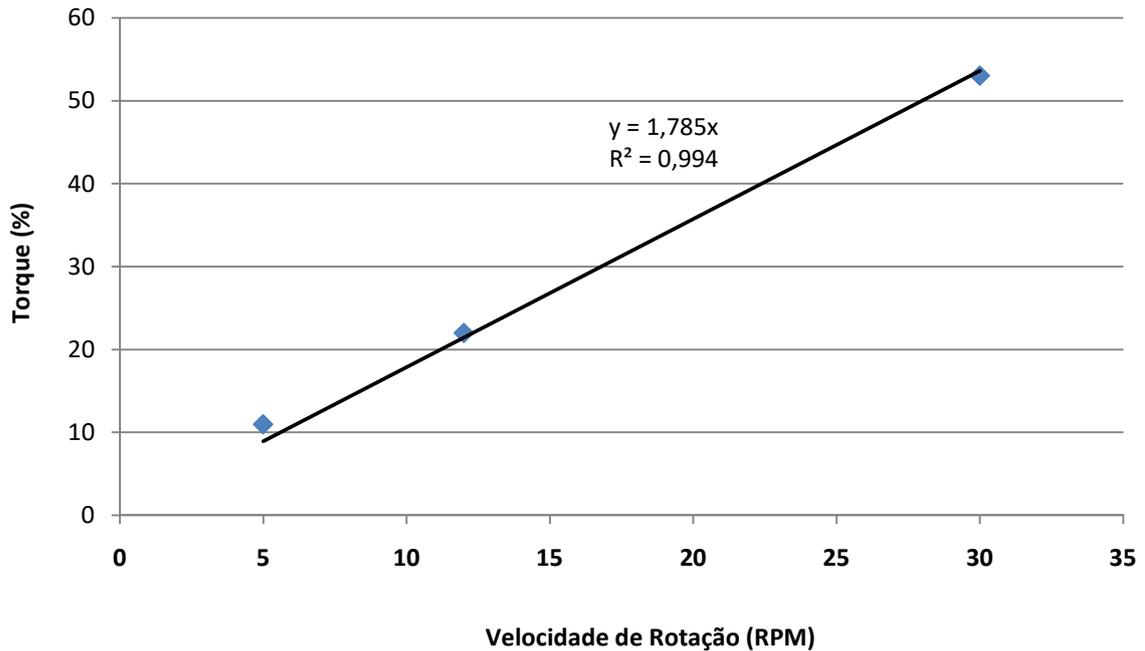
**Tabela 4.1** - Verificação do caráter newtoniano da mistura (glicose 91%).

<b>Torque (%)</b>	<b>Velocidade de Rotação (RPM)</b>
<b>11</b>	<b>5</b>
<b>22</b>	<b>12</b>
<b>53</b>	<b>30</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Possuindo estes dois parâmetros, um gráfico foi traçado e o caráter Newtoniano pôde ser estudado. O Gráfico 4.1 mostra graficamente os dados obtidos.

**Gráfico 4.1** - Verificação do caráter newtoniano da mistura utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o gráfico em mãos, percebe-se que o fluido apresenta um caráter Newtoniano, uma vez que a curva é linear, tende a passar pela origem (0,0) e ao aumentar a velocidade de rotação (que pode ser transformada matematicamente em taxa de deformação), eleva-se o torque (que também pode ser convertido em tensão de cisalhamento).

## 4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As médias das potências obtidas empiricamente foram tabeladas e, juntamente com a inserção de outros parâmetros como velocidade de rotação (N), diâmetro do impelidor (D), densidade do fluido ( $\rho$ ) e viscosidade do fluido ( $\mu$ ), foi possível calcular o Número de Potência ( $N_p$ ) e o Número de Reynolds (Re).

As Tabelas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 indicam os resultados obtidos para os diferentes impelidores.

**Tabela 4.2** – Dados experimentais e valores de Re e  $N_p$  obtidos – Âncora tubular com raspadores – ATR ( $D = 0,345$  m;  $\rho = 1380$  kg/m<sup>3</sup>;  $\mu = 7,5$  Pa.s).

<b>N (RPS)</b>	<b>P (W)</b>	<b>Re</b>	<b><math>N_p</math></b>
0,08	1,63	<b>1,83</b>	<b>416,57</b>
0,17	5,77	<b>3,65</b>	<b>184,79</b>
0,25	11,75	<b>5,48</b>	<b>111,45</b>
0,33	19,01	<b>7,30</b>	<b>76,11</b>
0,42	25,68	<b>9,13</b>	<b>52,64</b>
0,50	30,98	<b>10,95</b>	<b>36,74</b>
0,58	36,10	<b>12,78</b>	<b>26,97</b>
0,67	39,25	<b>14,60</b>	<b>19,64</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 4.3** - Dados experimentais e valores de Re e  $N_p$  obtidos – Âncora tubular sem raspadores – ATS ( $D = 0,345$  m;  $\rho = 1380$  kg/m<sup>3</sup>;  $\mu = 7,5$  Pa.s).

<b>N (RPS)</b>	<b>P (W)</b>	<b>Re</b>	<b><math>N_p</math></b>
0,08	0,59	<b>1,83</b>	<b>152,22</b>
0,17	2,30	<b>3,65</b>	<b>73,57</b>
0,25	5,11	<b>5,48</b>	<b>48,49</b>
0,33	9,08	<b>7,30</b>	<b>36,36</b>
0,42	14,25	<b>9,13</b>	<b>29,21</b>
0,50	20,66	<b>10,95</b>	<b>24,51</b>
0,58	28,35	<b>12,78</b>	<b>21,18</b>
0,67	37,32	<b>14,60</b>	<b>18,67</b>
0,75	45,96	<b>16,43</b>	<b>16,15</b>
0,83	54,98	<b>18,25</b>	<b>14,09</b>
0,92	60,75	<b>20,08</b>	<b>11,69</b>
1,00	65,36	<b>21,90</b>	<b>9,69</b>
1,08	71,87	<b>23,73</b>	<b>8,38</b>
1,17	75,11	<b>25,55</b>	<b>7,01</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 4.4** - Dados experimentais e valores de Re e  $N_p$  obtidos – Âncora de pás retas com raspadores – ARR ( $D = 0,345$  m;  $\rho = 1380$  kg/m<sup>3</sup>;  $\mu = 7,5$  Pa.s).

<b>N (RPS)</b>	<b>P (W)</b>	<b>Re</b>	<b><math>N_p</math></b>
0,08	2,00	<b>1,83</b>	<b>511,88</b>
0,17	6,93	<b>3,65</b>	<b>221,88</b>
0,25	13,91	<b>5,48</b>	<b>131,95</b>
0,33	20,20	<b>7,30</b>	<b>80,87</b>
0,42	25,65	<b>9,13</b>	<b>52,58</b>
0,50	29,84	<b>10,95</b>	<b>35,40</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 4.5** - Dados experimentais e valores de  $Re$  e  $N_p$  obtidos – Âncora de pás retas sem raspadores – ARS ( $D = 0,345$  m;  $\rho = 1380$  kg/m<sup>3</sup>;  $\mu = 7,5$  Pa.s).

<b>N (RPS)</b>	<b>P (W)</b>	<b>Re</b>	<b><math>N_p</math></b>
0,08	0,55	<b>1,83</b>	<b>140,61</b>
0,17	2,03	<b>3,65</b>	<b>64,89</b>
0,25	4,45	<b>5,48</b>	<b>42,26</b>
0,33	7,88	<b>7,30</b>	<b>31,53</b>
0,42	12,35	<b>9,13</b>	<b>25,31</b>
0,50	17,93	<b>10,95</b>	<b>21,27</b>
0,58	24,66	<b>12,78</b>	<b>18,42</b>
0,67	32,56	<b>14,60</b>	<b>16,29</b>
0,75	41,75	<b>16,43</b>	<b>14,67</b>
0,83	52,27	<b>18,25</b>	<b>13,39</b>
0,92	60,10	<b>20,08</b>	<b>11,57</b>
1,00	65,56	<b>21,90</b>	<b>9,72</b>
1,08	70,98	<b>23,73</b>	<b>8,28</b>
1,17	76,80	<b>25,55</b>	<b>7,17</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 4.6** – Dados experimentais e valores de  $Re$  e  $N_p$  obtidos – Helicoidal – H ( $D = 0,36$  m;  $\rho = 1380$  kg/m<sup>3</sup>;  $\mu = 7,5$  Pa.s).

<b>N (RPS)</b>	<b>P (W)</b>	<b>Re</b>	<b><math>N_p</math></b>
0,08	0,54	<b>1,99</b>	<b>111,73</b>
0,17	3,49	<b>3,97</b>	<b>90,43</b>
0,25	8,61	<b>5,96</b>	<b>66,00</b>
0,33	15,87	<b>7,95</b>	<b>51,35</b>
0,42	24,14	<b>9,94</b>	<b>40,00</b>
0,50	29,28	<b>11,92</b>	<b>28,08</b>
0,58	34,11	<b>13,91</b>	<b>20,60</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Através da análise das tabelas, nas condições deste projeto (regime laminar), é possível verificar que ao elevar a velocidade de rotação,  $N$ , ou ainda, o número de Reynolds,  $Re$ , há uma diminuição do número de potência,  $N_p$ . O número de potência é diretamente proporcional à potência consumida. No entanto, retomando a visualização da Equação 10, nota-se que a velocidade de rotação está elevada à terceira potência no denominador, influenciando o número de potência. Assim, quanto maior a velocidade de rotação do impelidor, menor tende a ser o número de potência.

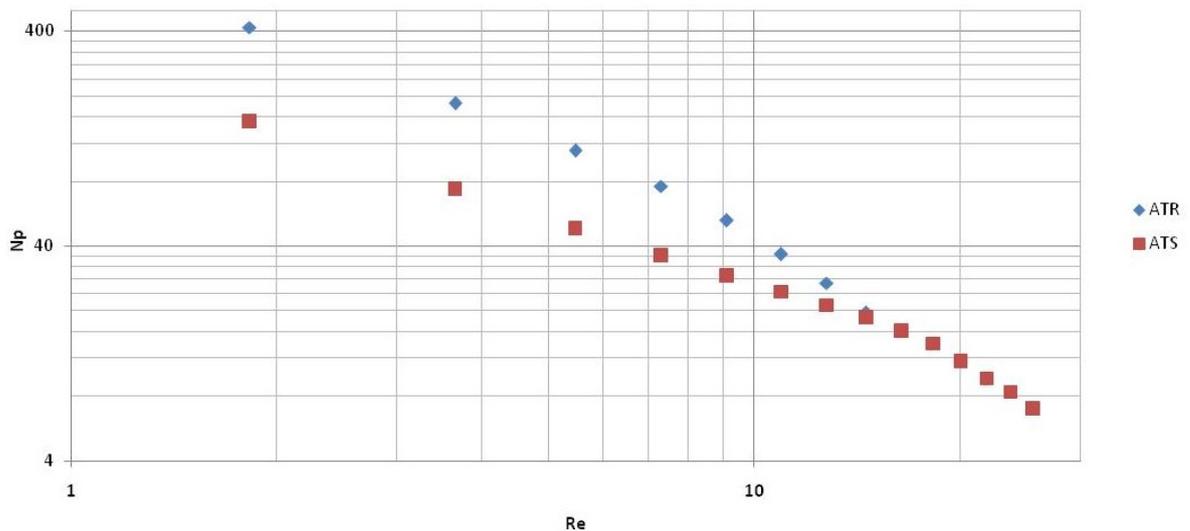
### 4.3 COMPARATIVO DOS IMPELIDORES ÂNCORA DE MESMAS GEOMETRIAS: COM E SEM RASPADORES

Um comparativo foi realizado para estudar a influência dos raspadores no consumo de potência dos impelidores âncoras.

#### 4.3.1 Âncora tubular

O primeiro âncora estudado foi o de perfil tubular. A partir do Gráfico 4.2 a seguir, nota-se claramente uma maior potência do impelidor âncora com o uso de raspadores no regime laminar. O atrito existente entre o raspador e a parede do tanque, bem como o aumento da área de ataque do fluido elevam o torque, exigindo mais do motor no desenvolvimento da rotação do impelidor. O torque mais elevado garante valores maiores de Números de Potência. Esta diferenciação se torna mais evidente quando a viscosidade do fluido é um parâmetro importante a ser considerado.

**Gráfico 4.2** - Comparativo entre curvas de potência para o impelidor de perfil tubular com e sem raspadores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Era esperado, e foi confirmado pelos testes, um menor consumo de potência para o impelidor sem raspadores, uma vez que este não conta com o incremento de torque gerado pelo uso dos raspadores, fazendo com que o esforço despendido pelo sistema para movimentar o fluido seja menor.

Nota-se que foi possível coletar mais pontos com o impelidor sem raspadores.

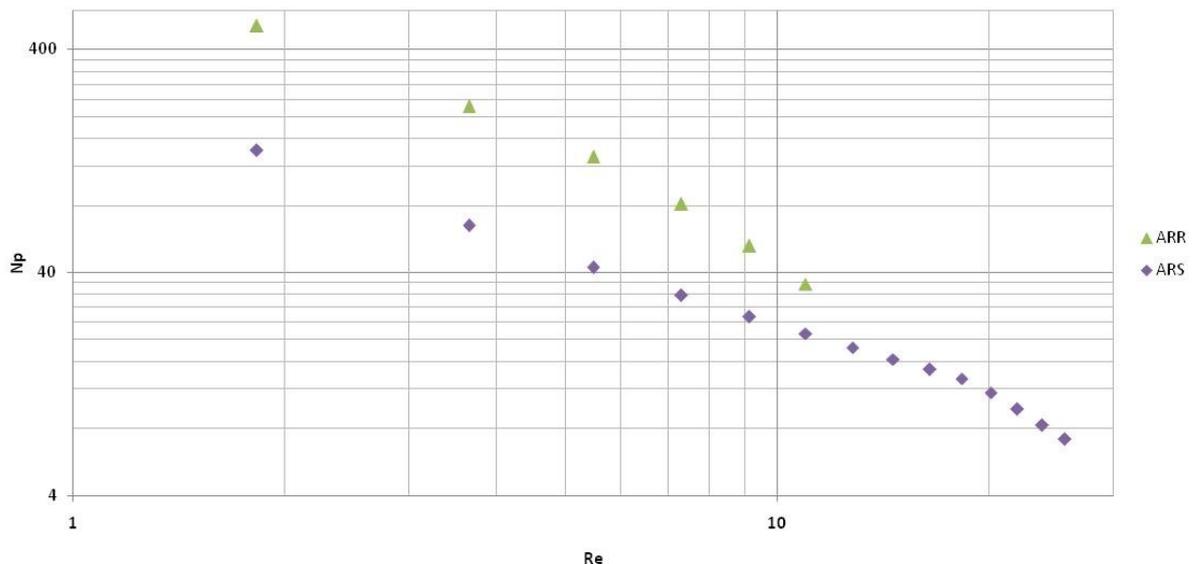
Como já mencionado anteriormente, a alta viscosidade e o uso dos raspadores limitaram a captura de dados pelo torquímetro (limite de torque do aparelho) por mais que se elevasse a rotação via *software*.

#### 4.3.2 Âncora de pás retas

Analogamente ao âncora tubular, um estudo comparativo entre curvas de potência foi realizado com o âncora de pás retas. Novamente, a presença ou ausência de raspadores foi estudada para apreciar a diferença da potência consumida em ambas situações.

O Gráfico 4.3 a seguir elucidada este estudo.

**Gráfico 4.3** - Comparativo entre curvas de potência para o impelidor âncora de pás retas com e sem raspadores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

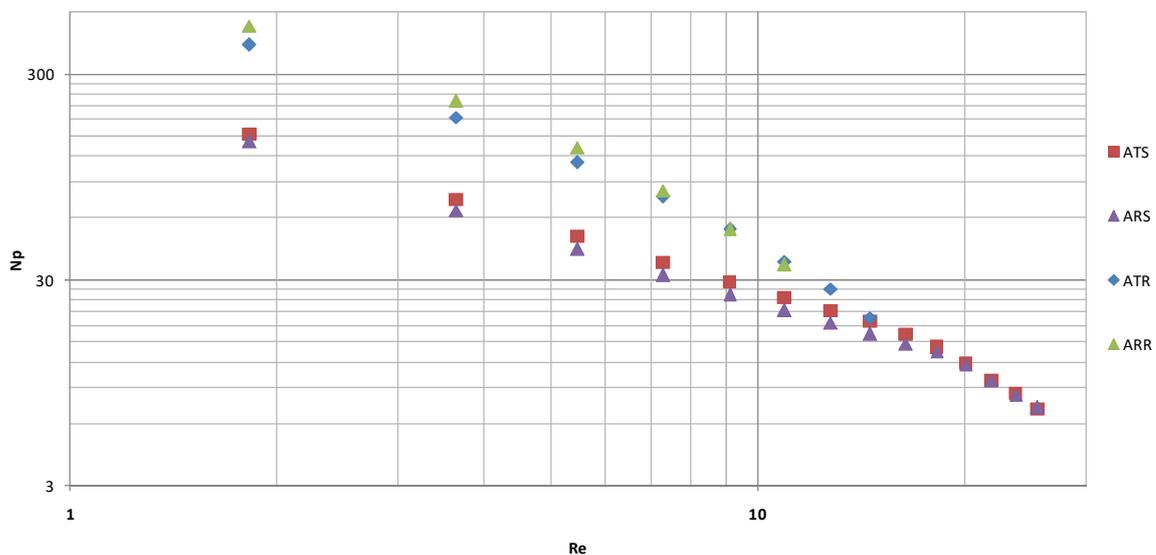
Praticamente a mesma constatação mencionada anteriormente para justificar a diferença encontrada pode ser utilizada. A presença dos raspadores acentua a potência medida, devido à existência da força de atrito e do aumento da área de ataque ao fluido, o que elevam o torque.

De forma semelhante ao impelidor de perfil tubular, mais pontos foram obtidos quando não houve o uso de raspadores.

#### 4.4 COMPARATIVO DOS IMPELIDORES ÂNCORA DE DIFERENTES GEOMETRIAS: COM E SEM RASPADORES

Um estudo comparativo foi realizado para verificar a potência consumida entre os os impelidores âncora de diferentes geometrias (pás retas e perfil tubular) nas mesmas condições (com e sem raspadores). O intuito foi verificar se a geometria influencia significativamente no consumo energético.

**Gráfico 4.4** - Comparativo entre curvas de potência para os impelidores âncora de mesmas geometrias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o Gráfico 4.4, os impelidores âncora de diferentes geometrias comportam-se de forma bem semelhante nas condições testadas (com ou sem o uso de raspadores) no que tange consumo de potência.

A geometria, portanto, não é um parâmetro que influencia significativamente no consumo de potência em ambos os casos, nas condições deste estudo. Mesmo que o fluido deslize mais facilmente sobre uma superfície tubular em movimento do que sobre um anteparo plano (pás planas), a elevação do torque e a consequente elevação do Número de Potência é observada de forma pouco pronunciada (quando do uso dos raspadores) para as velocidades de rotação mais baixas, em que é necessário um maior esforço do sistema para fazer com que o fluido entre em movimento. Para rotações maiores, a diferença no consumo de potência entre os diferentes impelidores é pequena. A partir deste resultado, é possível constatar que, no regime laminar com as condições testadas, o formato geométrico não é um

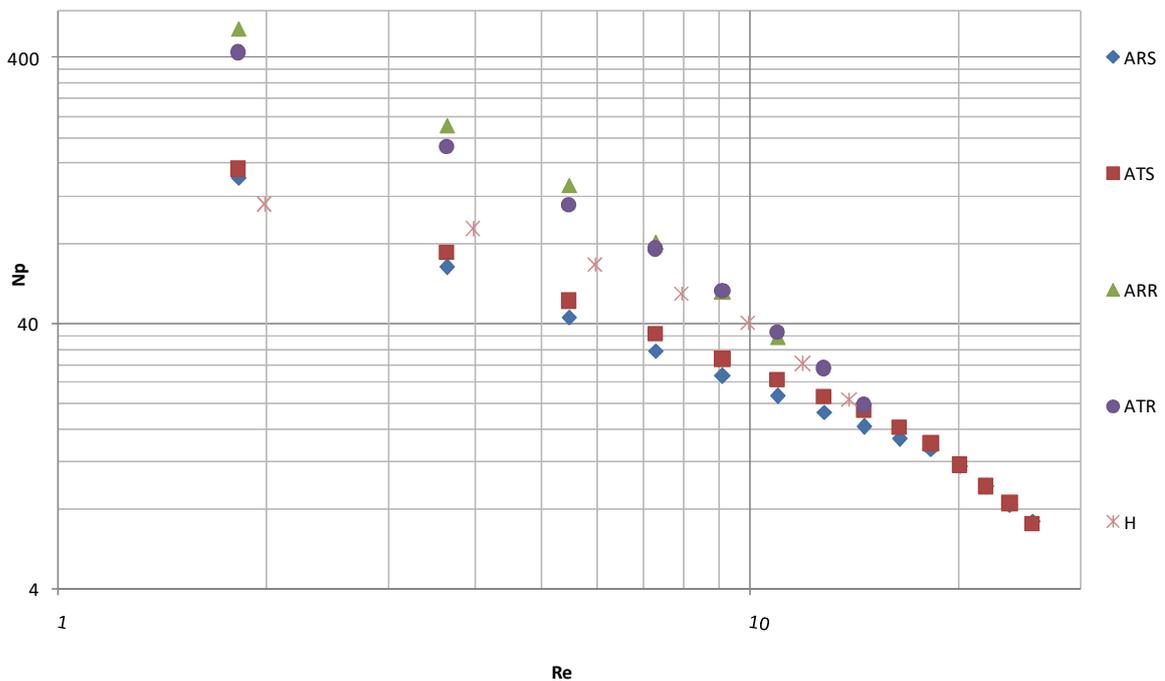
parâmetro que afeta significativamente no consumo de potência dos impelidores âncoras do projeto (tanto na presença quanto na ausência de raspadores).

A teoria mostra que, com fluidos de baixas viscosidades (escoamento turbulento) as pás curvas possuem um consumo de potência consideravelmente menor, já que a geometria e o formato das pás afetam significativamente o  $N_p$  e o bombeamento. No laminar, tal fato não é observado.

#### 4.5 CURVAS DE POTÊNCIA – VISÃO GERAL

As curvas de potência para os diferentes impelidores no regime laminar são dadas abaixo através do Gráfico 4.5:

**Gráfico 4.5** - Curvas de potência para os impelidores do projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, as curvas seguem um mesmo padrão e apresentam uma inclinação bem parecida. Para número de Reynolds menor que 10 observa-se um comportamento linear, com o número de potência diminuindo com o aumento de Reynolds, como esperado.

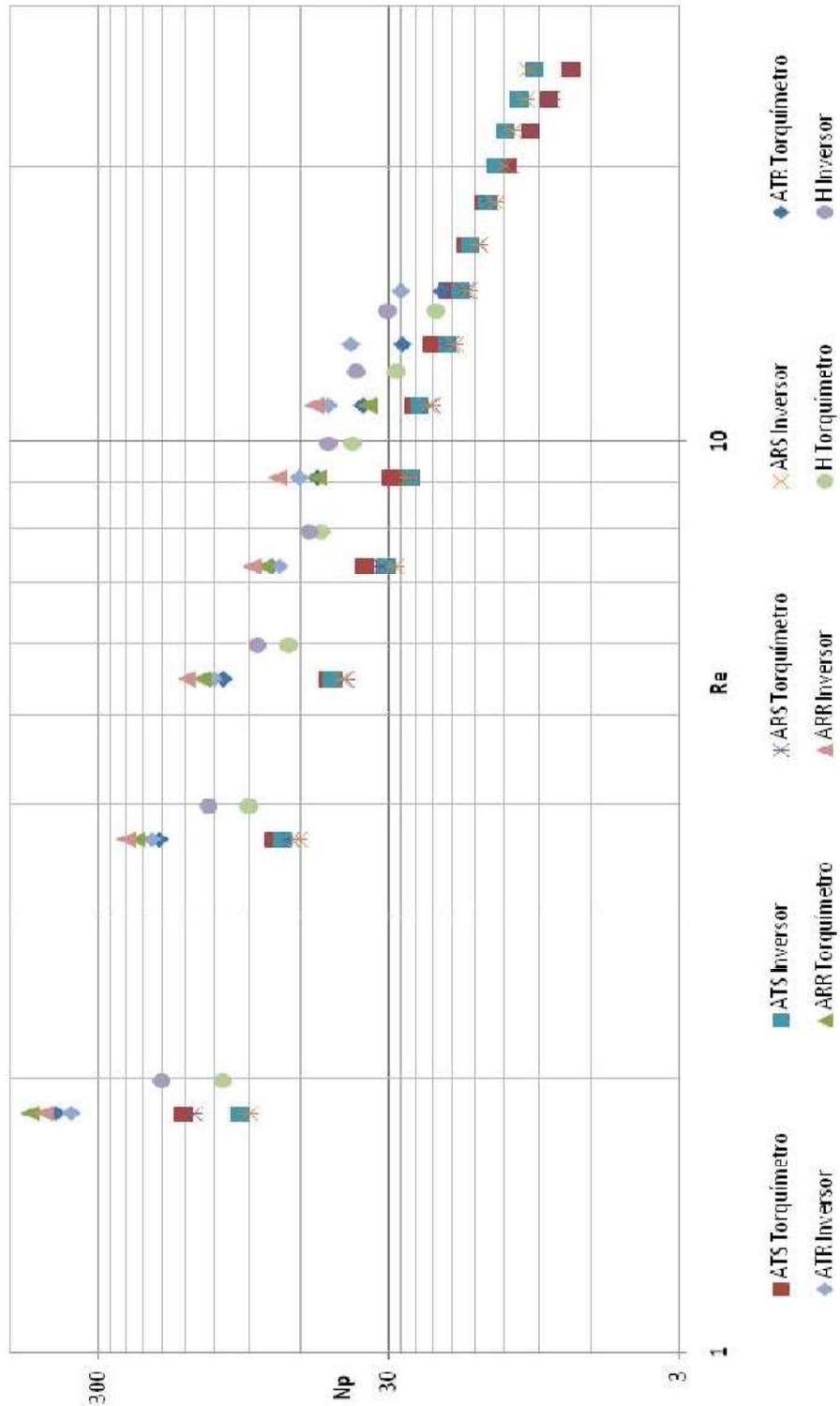
Observa-se pelo Gráfico 4.5 que os âncoras com raspadores apresentam potências mais elevadas para números de Reynolds menores (Região Laminar). Este resultado já era esperado, pois a existência dos raspadores prevê um contato com as paredes do tanque, assim

sendo, ocorre uma elevação do torque. Com o aumento do torque, eleva-se o consumo de potência. O impelidor para desenvolver sua rotação necessita dispor de um maior torque para que a mistura altamente viscosa seja movimentada. Desta forma, uma maior potência é necessária, elevando o valor do Número de Potência. À medida que a rotação é aumentada, a mistura tende a acompanhar o movimento do impelidor e a tendência é que as forças de atrito (contrárias ao movimento) não contribuam fortemente no valor do torque e, então, observa-se um comportamento semelhante das curvas, em que elas apresentam mesmos patamares.

O impelidor helicoidal apresentou uma curva de potência intermediária (entre os âncoras com e sem raspadores) nesta faixa de Reynolds. Por ser um impelidor mais largo, e com uma maior área global de arraste de fluido, é exigido do sistema uma quantidade de torque considerável para que ele consiga agitar o fluido. Pelo fato de não existir contato com as paredes do tanque (ausência de raspadores), não existem as forças de atrito como no caso dos impelidores âncora com raspadores e, por isso, não consome tanta potência quanto os âncoras mencionados.

#### 4.6 COMPARATIVO ENTRE DADOS DO TORQUÍMETRO E DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

**Gráfico 4.6** - Comparativo das curvas de potência utilizando o torquímetro e o inversor de frequência para os impelidores do projeto.



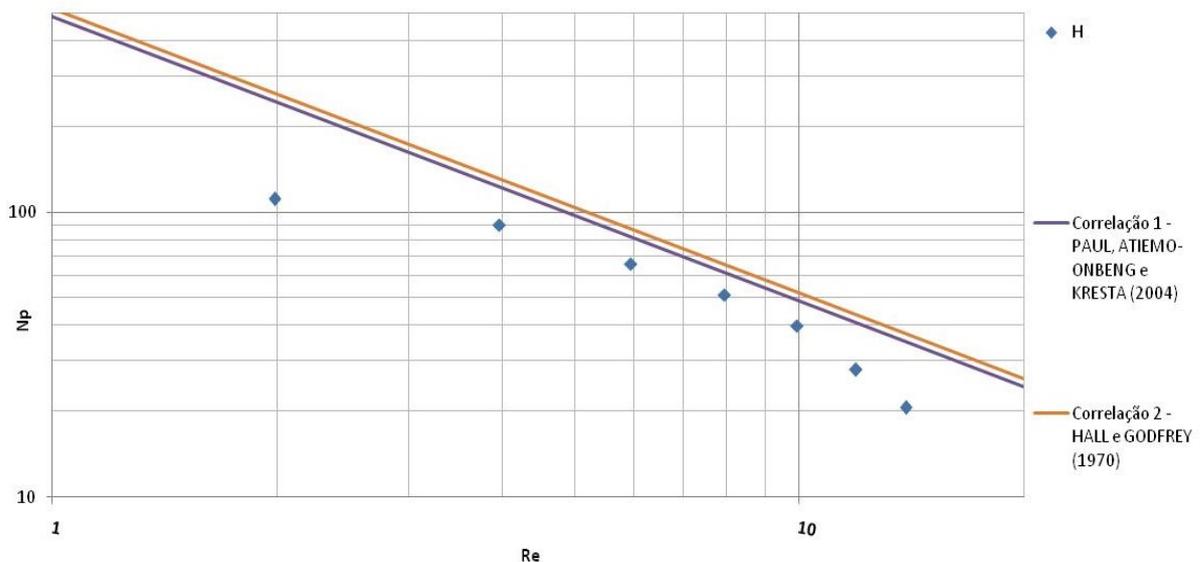
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificar a confiabilidade dos resultados apresentados, dados exibidos também pelo inversor de frequência foram coletados e plotados. O comparativo entre dados obtidos através do torquímetro e do inversor de frequência podem ser visualizados no Gráfico 4.6. Analisando este gráfico, nota-se que a diferença entre os dados coletados via torquímetro e inversor é pequena. Tal fato ajuda a concluir que ambos os métodos de captura de dados levam a resultados bem próximos. O inversor de frequência considera o consumo do motor, do eixo e do impelidor. Dessa forma é sempre esperado um maior consumo de potência com o inversor de frequência, e os dados experimentais (com algumas exceções pontuais) confirmam isso.

#### 4.7 COMPARATIVO ENTRE DADOS DA LITERATURA E DO PROJETO PARA O IMPELIDOR HELICOIDAL

Para fins de comparação do resultado obtido neste projeto com outros já reconhecidos no meio acadêmico, o Gráfico 4.7 expõe o resultado de duas literaturas em que pesquisadores trabalharam com o impelidor helicoidal e obtiveram correlações para seus estudos.

**Gráfico 4.7** - Comparativo entre curvas de potência experimental (H) e da literatura para o impelidor helicoidal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: H - Helicoidal (Experimental); Correlação 1 – PAUL, ATIEMO-ONBENG e KRESTA (2004); Correlação 2 - HALL e GODFREY (1970).

Para verificar o quão distante os valores experimentais estão das correlações da literatura, o Erro Relativo,  $(\Delta\bar{x})_r$ , dado em porcentagem, foi calculado através da razão entre o Erro Absoluto,  $\Delta\bar{x}$  (diferença entre os valores obtidos para os Números de Potência experimentais e da correlação para determinado Re), e o valor do Número de Potência fornecido pela correlação,  $\bar{x}$  (para fins de cálculo foi utilizada a Correlação 1 – PAUL, ATIEMO-ONBENG e KRESTA (2004) por ser a mais próxima da curva experimental). Quanto maior o erro relativo, menor a exatidão.

$$(\Delta\bar{x})_r = \frac{\Delta\bar{x}}{\bar{x}} \times 100 \quad (17)$$

Ao analisar a Tabela 4.7, nota-se que a curva de potência experimental (H) possui pontos com erros relativos que variaram de 16% à 54% (média de 30%), indicando que os resultados alcançados não estão próximos dos valores obtidos pelas correlações utilizadas. Uma justificativa para o afastamento entre as curvas e a perda da linearidade se dá a eventuais erros experimentais (como rede elétrica não estabilizada e/ou contato do impelidor com a parede do tanque em rotações mais elevadas), que podem ter prejudicado a qualidade do resultado final.

**Tabela 4.7** – Erro relativo – helicoidal.

Ponto	Re	$\Delta\bar{x}$	$\bar{x}$	$(\Delta\bar{x})_r$ (%)
1	1,99	133,81	245,54	54
2	3,97	32,65	123,08	27
3	5,96	15,99	81,99	19
4	7,95	10,11	61,46	16
5	9,94	9,26	49,26	19
6	11,92	12,92	41,00	32
7	13,91	14,53	35,13	41
<b>MÉDIA</b>	-	-	-	<b>30</b>

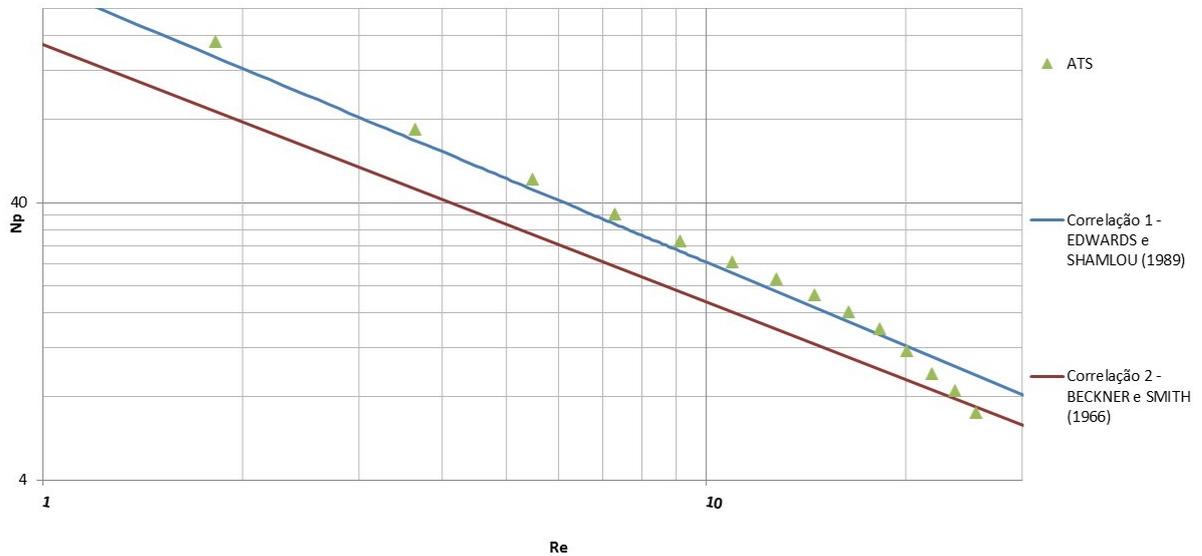
Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.8 COMPARATIVO ENTRE DADOS DA LITERATURA E DO PROJETO PARA O IMPELIDOR ÂNCORA

Os impelidores do tipo âncora geram agitação que atua em quase todo o volume do tanque. Assim como o impelidor helicoidal, os impelidores âncora também são para fluidos de alta viscosidade. Os resultados experimentais desse trabalho foram comparados

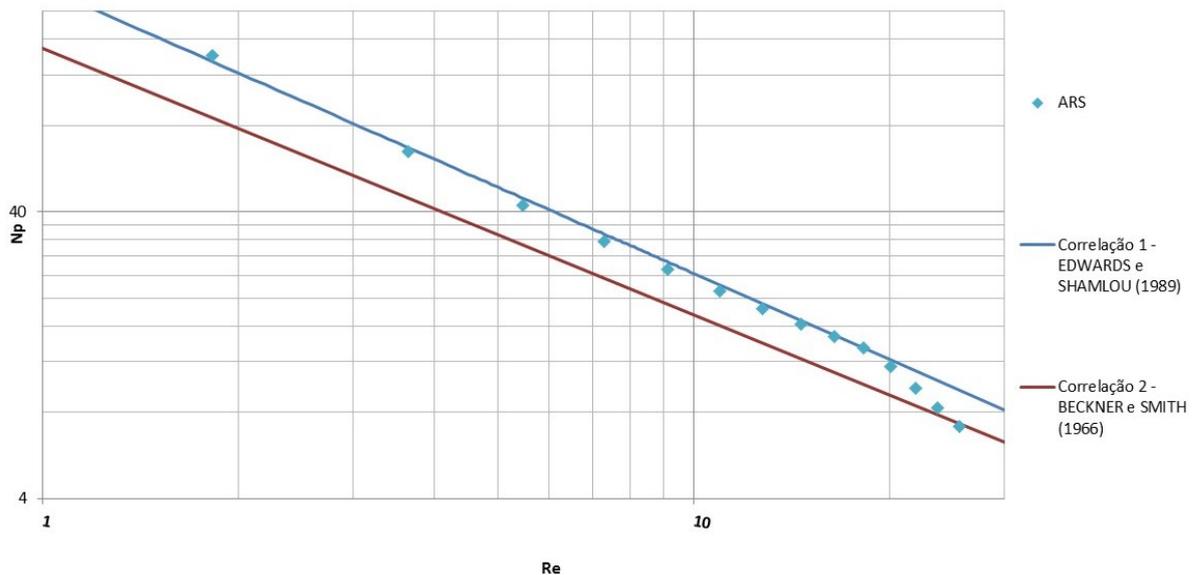
com dados da literatura. Os Gráficos 4.8, 4.9 expõem os comparativos.

**Gráfico 4.8** - Comparativo entre curvas de potência experimental (ATS) e da literatura para impelidores âncora sem raspadores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Gráfico 4.9** - Comparativo entre curvas de potência experimental (ARS) e da literatura para impelidores âncora sem raspadores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da observação dos gráficos, nota-se que as curvas experimentais deste projeto apresentaram resultados próximos em relação à literatura quando os impelidores (de pás retas ou de perfil tubular) não possuem raspadores. É importante ressaltar que as correlações de Edwards e Shamlou (1989) e Beckner e Smith (1966) são baseadas em dados experimentais sem o uso de raspadores.

Novamente, o Erro Relativo foi utilizado para verificar o quão distante os valores experimentais estão da Correlação (foi utilizada a Correlação 1 – EDWARDS e SHAMLOU (1989) por ser a mais próxima da curva experimental).

As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam os resultados obtidos para os impelidores ATS e ARS, respectivamente.

**Tabela 4.8** – Erro relativo – âncora tubular sem raspador - ATS.

Ponto	Re	$\Delta\bar{x}$	$\bar{x}$	$(\Delta\bar{x})_r$ (%)
1	1,83	18,34	133,88	14
2	3,65	6,63	66,94	10
3	5,48	3,87	44,63	9
4	7,30	2,89	33,47	9
5	9,13	2,43	26,78	9
6	10,95	2,19	22,31	10
7	12,78	2,05	19,13	11
8	14,60	1,94	16,74	12
9	16,43	1,28	14,88	9
10	18,25	0,70	13,39	5
11	20,08	0,48	12,17	4
12	21,90	1,47	11,16	13
13	23,73	1,92	10,30	19
14	25,55	2,55	9,56	27
<b>MÉDIA</b>	-	-	-	<b>11</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 4.9** – Erro relativo – âncora reta sem raspador - ARS.

Ponto	Re	$\Delta\bar{x}$	$\bar{x}$	$(\Delta\bar{x})_r$ (%)
1	1,83	6,74	133,88	5
2	3,65	2,05	66,94	3
3	5,48	2,37	44,63	5
4	7,30	1,94	33,47	6
5	9,13	1,46	26,78	5
6	10,95	1,05	22,31	5
7	12,78	0,71	19,13	4
8	14,60	0,44	16,74	3
9	16,43	0,20	14,88	1
10	18,25	0,00	13,39	0
11	20,08	0,60	12,17	5
12	21,90	1,44	11,16	13
13	23,73	2,02	10,30	20
14	25,55	2,39	9,56	25
<b>MÉDIA</b>	-	-	-	<b>7</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Através da análise das Tabelas 4.8 e 4.9, observa-se que as curvas de potência experimentais (ATS e ARS) possuem erros relativos baixos para grande parte dos pontos (ampla faixa de validade), indicando que os resultados obtidos estão próximos dos presentes na literatura. Assim, nas condições de trabalho deste projeto, as correlações utilizadas se aplicam aos impelidores âncoras testados quando os raspadores não estão presentes.

#### 4.9 DIFICULDADES OBSERVADAS

Um parâmetro observado foi a irregularidade das paredes do tanque. Por razões construtivas, as paredes do tanque nunca formam um cilindro perfeito, ou seja, sua circunferência não é perfeita, fazendo com que os impelidores do estudo tivessem um contato com maior ou menor proximidade em certos pontos com a parede do tanque, podendo ter afetado a precisão dos dados em determinadas velocidades de rotação.

Além disso, as molas que seguram os raspadores podem ter trabalhado a uma pressão muito elevada, influenciando nos resultados finais.

Outro fator refere-se ao impelidor helicoidal. Tal impelidor foi usinado fora de centro ideal e seus raios apresentam sensível diferença em alguns pontos. Há um sistema de compensação no próprio equipamento, tornando realizável o projeto. No entanto, o fato da parede ser ligeiramente irregular pode ter levado a uma medida de consumo superior a que seria obtida se o impelidor estivesse simétrico e centralizado.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

---

---

### 5.1 CONCLUSÕES

Após o levantamento e compilação dos dados experimentais, com posterior plotagem dos pontos nos gráficos e análise das curvas de potência foi possível, através de comparativos, concluir que o uso de raspadores realmente eleva o torque medido e, conseqüentemente, a potência dos impelidores do tipo Âncora (pás retas e de perfil tubular), tornando-os, em relação à potência consumida, os de maior consumo energético para este estudo.

Outro fato que pôde ser observado é que não há diferença significativa em termos de consumo de energia entre os impelidores âncoras (com ou sem o uso de raspadores) analisando suas curvaturas. Assim, a geometria não é um parâmetro que influencia substancialmente na potência consumida, nas condições deste estudo.

O impelidor helicoidal consumiu menos potência que os impelidores âncoras com o uso de raspadores.

O uso do torquímetro e do inversor de frequência apresentaram resultados semelhantes, com um consumo mais elevado para o inversor de frequência, como era de se esperar, visto que, nesse caso, adiciona-se o consumo energético do motor e do eixo. Observou-se em alguns pontos da curva comparativa entre o consumo energético do torquímetro e do inversor de frequência a indicação de um maior consumo energético para o torquímetro, provavelmente ocasionado por erros experimentais. A proximidade dos resultados aumenta a confiabilidade dos resultados obtidos. O inversor de frequência não possui custo adicional (já é disponibilizado com o motor) e consegue obter dados semelhantes aos do torquímetro. É uma boa opção para projetos que não possuem recursos extras para a aquisição do torquímetro (equipamento caro).

A comparação de dados da literatura com os resultados obtidos indicou que os dados experimentais se correlacionaram bem (âncoras sem raspadores). No regime laminar, valores próximos da literatura foram atingidos.

A mistura glicose-água comportou-se como fluido newtoniano no regime laminar, onde a viscosidade da mistura é elevada.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para incrementar este estudo e propagar um maior conhecimento empírico no meio acadêmico a respeito de potência de impelidores de proximidade, o uso de fluidos não-newtonianos e de outros fluidos newtonianos seria importante.

Um estudo envolvendo tempo de mistura, com o uso de traçadores específicos seria também importante.

O uso de luz estroboscópica para visualização dos fluxos criados no fluido com o uso de impelidores desta natureza seria interessante. O PIV (*Particle Image Velocimetry*) poderá ser utilizado para a determinação do campo de velocidade.

Para aperfeiçoar o estudo, melhorando a performance dos futuros projetos, a porção cilíndrica do tanque poderá ser refeita, melhorando a uniformidade.

Como sugestão, a compra de um motor com potência mais elevada auxiliaria no processo de captura de mais dados, cobrindo uma faixa maior de Reynolds para diferentes fluidos.

A mola presente nos raspadores merece atenção especial, uma vez que é essencial para aumentar ou diminuir a pressão dos raspadores sobre a parede do tanque, podendo influenciar os valores coletados de potência. Para trabalhos futuros, a retirada da mola deve apresentar novos resultados. A força hidrodinâmica gerada durante agitação do fluido seria o suficiente para a realização da raspagem do tanque, evitando um torque mais acentuado. Vale acrescentar que um anteparo deve ser posicionado após os raspadores para delimitar o ângulo de raspagem e evitar que eles percam sua função e não raspem a parede do tanque, ficando apenas imersos no fluido.

## REFERÊNCIAS

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K.; **An introduction to rheology.** Amsterdam: Elsevier, 1989, 199 p.

BATES, R. L.; FONDY, P. L.; CORPSTEIN, R. R.; **An examination of some geometric parameters of impeller power.** I&EC Proc. Des. Dev., v. 2, n.4, 1963.

BATTAGLINI, N. M.; **Avaliação do comportamento de impelidores especiais em mistura de fluidos.** Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista - Campus Botucatu, 1998. 116 p. Tese (Doutorado).

BECKNER, J. L.; SMITH, J. M.; **Anchor-agitated systems: power input with newtonian and pseudo-plastic fluids.** Trans. Inst. Chem. Eng., 44, p. 224, 1966.

BELITZ, H. D.; GROSCH, W.; **Food chemistry.** Berlin, New York: Springer Verlag, 1987. p.128-200.

BOWEN, R. L.; **Agitation intensity: key to scaling up flow - sensitive liquid systems.** Chemical Engineering, p.159-168. 1985.

BURDOCK, G. A.; **Encyclopedia of food and color additives.** Boca Raton: CRC Press, 1997, p.711.

CARREAU, P. J.; CHHABRA, R. P.; CHENG, J.; **Effect of rheological properties on power consumption with helical ribbon agitators.** AIChE Journal, v. 39, n. 9, p.1421-1430, 1993.

CHARLEY, H.; WEAVER, C.; **Sugar, alternative sweeteners and confections.** Upper Saddle River: Merrill Prentice Hall, 1998. Cap. VIII, p.119-135.

CHENG, J.; CARREAU, P. J.; **Mixing in the transition flow regime with helical ribbon agitators.** The Can. J. Chem. Eng., v. 72, p.418-430, 1994.

CHOWDHURY, R.; TIWARI, K. K.; **Power consumption studies of helical ribbon-screw mixers.** Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., v. 18, n. 2, p.227-231, 1979.

CHUDACEK, M. W.; **Impeller power numbers and impeller flow numbers in profiled bottom tanks.** Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., v. 24, p.858-867, 1985.

EDWARDS, M. F.; WILKINSON, W. L.; **Heat transfer in agitated vessels, Part I – Newtonian Fluids,** The Chemical Engineer, n.264, p.310-318, 1972.

EDWARDS, M. F.; SHAMLOU, P. A.; **Power consumption of anchor impellers in newtonian and non-newtonian liquids.** Chemical Engineering Res. Des., v.67, p.537-543, 1989.

FELTON, L. A.; **Remington: Essentials of pharmaceuticals.** London: Pharmaceutical Press, 2013, p.454-455.

GARAVITO, A. M. T.; **Determinação experimental do consumo de potência para impelidores âncora e helicoidal usando fluidos pseudoplásticos de alta viscosidade.** Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2013. 27 p. Dissertação (Mestrado).

GATES, L. E.; HENLEY, T. L.; FENIC, J. G.; **How to select the optimum turbine agitator.** Chemical Engineering, p.102, 1975.

HALL, K. R.; GODFREY, J. C.; **Power consumption by helical ribbon impellers.** Trans. Instn. Chem. Engrs., v. 48, p. 201-208, 1970.

HIXSON, A. W.; BAUM, S. J.; Ind. Eng. Chem., v.34, p.194-208, 1942.

HIXSON, A. W.; LUEDEKE, V. D.; Ind. Eng. Chem., v.29, p.927, 1937.

HO, F. C.; KWONG, A.; **A guide do designing special agitators.** Chem. Engineering, p.94, 1973.

HOCKEY, R. M.; NOURI, J. M.; PINHO, F.; **Flow visualization of newtonian an non-newtonian fluids in stirred reactor.** Prague: Int, Symp. of Flow Visualization, v.22, p.21-25, 1989.

JOAQUIM JR., C. F.; CEKINSKI, E.; NUNHEZ, J. R.; URENHA, L. C.; **Agitação e mistura na indústria.** Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007, 222 p.

JEFFERY, M. S.; **Key functional properties of sucrose in chocolate and sugar confectionery.** Chicago: Food Technol., v.47, n.1, p.141-144, 1993.

KOWALSK, A. J.; COOKE, M.; HALL, S.; **Expression for turbulent power draw of an in-line Silverson high shear mixer.** Elsevier, v.66, p.241-249, 2011.

KRESTA, S. M.; ETCHELLS, A. W.; DICKEY, D. S.; ATIEMO-ONBENG, V. A.; **Advances in Industrial Mixing: A Companion to the Handbook of Industrial Mixing.** Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2015.

KRESTA, S. M.; WOOD, P. E.; **The mean flow field produced by a 45° pitched blade turbine.** Changes in recirculation pattern due to off bottom clearance; Can. J. Chem. Eng. v.71, p. 42-53, 1993.

KUKUKOVA, A.; AUBIN, J.; KRESTA, S. M.; **A new definition of mixing and segregation: Three dimensions of a key process variable.** Elsevier. v.87, n.4, p.633-647, 2009.

MACHADO, M. B.; BITTORF, K. J.; ROUSSINOVA, V. T.; KRESTA, S. M.; **Transition from turbulent to transitional flow in the top half of a stirred tank.** Chemical Engineering Science; 98, p.218-230, 2013.

MARTINI, T. L.; **Influência dos impelidores e condições de mistura na produção de insumos químicos para o setor coureiro.** Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. 33 p. Trabalho de Conclusão de Curso.

MCKEEN, L. W.; **Fluorinated Coatings and Finishes Handbook: The Definitive User's Guide.** 2<sup>nd</sup> Ed., Elsevier Science, 2015, p.89-155.

MEYER, H. P.; SCHMIDHALTER, D. R.; **Industrial Scale Suspension Culture of Living Cells.** Weinheim: Wiley Blackwell, 2014.

MITSCHKA, P.; **Simple conversion of Brookfield RVT: readings into viscosity functions.** Prague: Rheologica: Acta, v.21, n.2, p.207-209, 1982.

MURRAY, D.C.; LUFT, L. R.; **Low-DE corn starch hydrolysates.** Food Technol., v.27; p.32; 1973.

NAGATA, S.; **Mixing - Principles and applications**. Kodansha Scientific Books, 1975, 458 p.

NAGATA, S.; YOSHIOKA, T.; YOKOYAMA, T.; **Studies on the power requirement of mixing impeller**. Memoirs Fac. Eng., Kyoto Univ., v.17, p.175-185, 1955.

NIENOW, A. W.; MILES, D.; **Impeller power numbers in closed vessels**. 1 & EC Proc. Des. Dev., v.10, n.1, p.41-43, 1971.

NOVAK, V.; DITL, P.; RIEGER, F.; **Mixing in unbaffled vessels the influence of an eccentric impeller position on power consumption and surface aeration**. Proc. of the 4<sup>th</sup> Eur. Conf. On Mixing, p.57-70, 1982.

OLDSHUE, J. Y.; **Fluid Mixing Technology**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983.

PAUL, E. L.; ATIEMO-ONBENG, V. A.; KRESTA, S. M.; **Handbook of industrial mixing: science and practice**. New Jersey: Wiley Interscience, 2004, 1377 p.

PEREIRA, R. G.; OLIVEIRA, J. L.; ROMEIRO, G. A.; **Characterization and energetic utilization of coconut peel oil obtained by low temperature conversion process**.: Encontro de Energia no Meio Rural, 4, Campinas, 2002. Disponível em <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100018&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100018&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em 06/07/2017

RAZUK, P. C.; **Um estudo sobre operações unitárias de agitação, troca de calor em tanques e mistura de pós**. Faculdade de Engenharia e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista – Campus Bauru, 1992. 143 p.

RUSHTON, J. H.; **Technology of Mixing**. Can. Chem. Proc. Ind., p.55-61, 1946.

RUSHTON, J. H.; COSTICH, E. W.; EVERETT, H. J.; **Power characteristics of mixing impellers**. Chem. Eng. Progress, p.395-467, 1950.

SANO, Y.; USUI, H.; **Interrelations among mixing time, power number and discharge flow rate number in baffled mixing vessels**. Journal of Chemical Engineering, v.18, n.1, p.47-52, 1985.

SAWINSKY, J.; HAVAS, G.; DEAK, A.; **Power requirement of anchor and helical ribbon impellers for the case of agitating newtonian and pseudo-plastic liquids.** Chem. Eng. Sci. v.31, p. 507-509, 1976.

SEW; Perfil da Empresa; Disponível em <<http://br.sew-eurodrive.com/firmenprofil/profil.htm>>. Acesso em 10/02/2017.

SILVA, J. L. G.; **Agitação e mistura na indústria de alimentos.** VIII SEMEALI; UEFS, 2010.

SILVA, J. L. G., **Análise crítica das correlações e parâmetros fundamentais em sistemas de agitação.** Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 173 p. Dissertação (Mestrado).

SPOGIS, N.; **Metodologia para determinação de curvas de potência e fluxos característicos para impelidores axiais, radiais e tangenciais utilizando a fluidodinâmica computacional.** Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 170 p. Dissertação (Mestrado).

TAKAHASHI, K.; SASAKI, M.; ARAI, K.; SAITO, S.; **Effects of geometrical variables of helical ribbon impellers on mixing of highly viscous liquids.** J. Chem. Eng. Japan, v. 15, n. 3, p.217-224, 1982.

TATTERSON, G. B.; **Fluid mixing and gas dispersion in agited tanks.** New York: McGraw-Hill, 1991. 548 p.

UHL, V. W.; GRAY, J. B.; **Mixing - theory and practice.** New York and London: Academic Press, v.1, 1966. 340 p.

WANG, J. J.; FENG, L. F.; GU, X. P.; WANG, K.; HU, C. H.; **Power consumption of inner-outer helical ribbon impellers in viscous newtonian an non-newtonian fluids.** Chem. Eng. Sci., v.55, p.2239-2342, 1999.

WHITE, A. B.; BRENNER, E.; Trans. Amer. Inst. Chem. Eng., v. 30, 585, 1934.

WU, J.; PULLUM, L.; **Performance analysis of axial flow mixing impellers.** AIChE Journal, v. 46, n.3, p. 489-498, 2000.